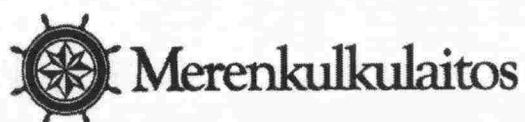
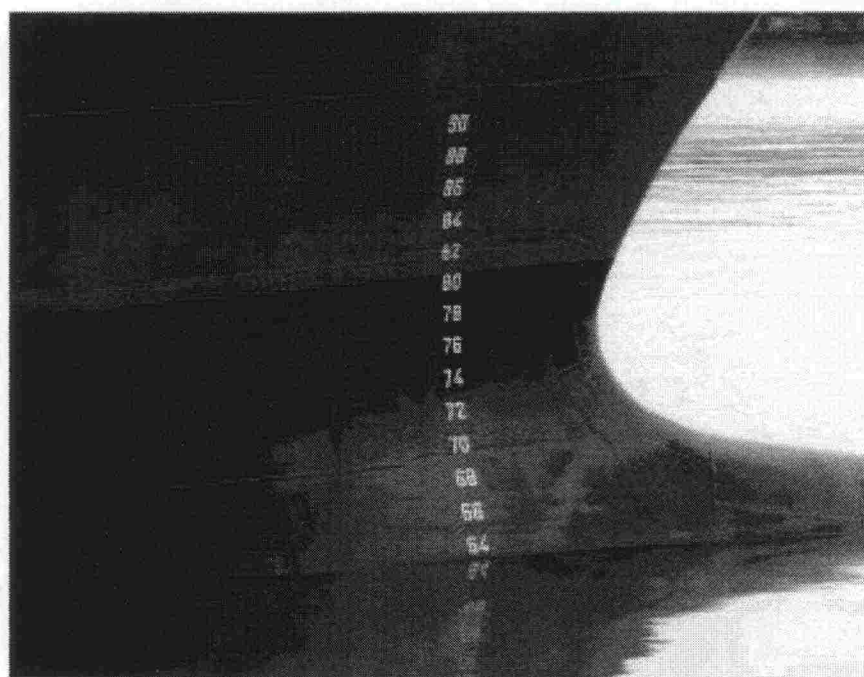


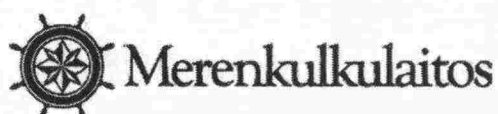
Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja 2/2004

Väyliä syvyyskäytäntöä koskeva riskianalyysi



Helsinki 2004
ISSN 1456-9442

Väylien syvyyskäytäntöä koskeva riskianalyysi



Julkaisija



Merenkulkulaitos

KUVAILULEHTI

Julkaisun päivämäärä

28.11.2003

Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) VTT Tuotteet ja tuotanto: Kai Happonen, Saara Hänninen, Timo Kukkanen, Tony Rosqvist, Jorma Rytönen		Julkaisun laji Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja	
		Toimeksiantaja Merenkulkulaitos	
Julkaisun nimi Väyliä syvyyskäytäntöä koskeva riskianalyysi			
Tiivistelmä <p>Suomen kauppamerenkulun pääväylillä suunnitellaan siirtymistä uuteen kulkusyvyyskäytäntöön, missä kartalla ilmoitettaisiin nykyisen kulkusyvyys sijaan väylän varmistettu vesisyvyys ja pohjato-pografia. Väylän suunniteltu kulkusyvyys ilmoitettaisiin uudessa käytännössä merkitsemällä se väylä-korttiin. Nykyinen vahvistetun kulkusyvyys käytäntö Suomessa on johtanut melko runsaasti varave-den arvoihin, eikä aluksen kannalta edullisia olosuhteita tai alhaista nopeutta ole voitu hyödyntää.</p> <p>Taloudellisilla seikoilla hyvin perusteltuun uudistukseen sisältyy myös riskejä. Syvyyskäytännön muuttamisen keskeinen riskitekijä liittyy pohjakosketusriskiin ja sen mahdolliseen kasvamiseen. Tässä tutkimuksessa arvioidaan riskianalyysimenetelmiä hyödyntäen syvyyskäytännön vaikutusta pohjakos- ketusriskiin. Pohjakosketusriskiin vaikuttavat riskitekijät voidaan jakaa kolmeen perusluokkaan:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Varavesitarpeen mitoittamiseen ja aluksen liikkeen hallintaan liittyvät riskitekijät 2. Reunaehtojen arvioinnista aiheutuvat riskit 3. Päätöksentekoprosessin sisältämät riskit. <p>Riskianalyysin esimerkkipöytä on käytetty Rauman Rihtniemen väylää. Väyläkohtainen riskimalli on kehitetty päätöksenteon tukivälineeksi ja se on prototyyppi. Käsitteellisellä tasolla riskimalli on geneerinen ja räätälöitävissä muden väyliä riskitarkasteluihin.</p>			
Avainsanat (asiasanat) riskianalyysi, syvyyskäytäntö, kulkusyvyys, syväys, alus, väylä, riski, pohjakosketus			
Muut tiedot Julkaistu myös VTT:n tutkimusraporttina NRO TUO34-033206, 28.11.2003			
Sarjan nimi ja numero Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja 2/2004		ISSN 1456-9442	ISBN
Kokonaissivumäärä 46 + liitteet (15 s)	Kieli suomi	Hinta 20 euroa	Luottamuksellisuus julkinen
Jakaja Merenkulkulaitos		Kustantaja	

Alkusanat

Suomen kauppamerenkulun pääväylillä on suunniteltu siirryttäväksi nykyisin ilmoitetusta suurimmasta sallitusta kulkusyvyydestä kansainvälisen käytännön mukaiseen väylän vesisyvyyden ilmoittamiseen. Nykyisen järjestelmän mukaan väylille on vahvistettu kulkusyvyydet haraamalla varmistetun vesisyvyyden ja suunnitteluohjeissa määritellyn varaveden perusteella. Varavesi määritelmänä ei ole yksikäsitteinen, sillä todellisuudessa se on voimakkaasti sidoksissa tilanne- ja aluskohtaisiin tekijöihin: aluksen nopeus, meren pohjan topografia, sää ja merenkäynti vaikuttavat varaveden määrään.

Siirtyminen kansainväliseen käytäntöön on tullut mahdolliseksi Suomessa toteutetun NAVI-projektin ansiosta. Paikanmäärityksen tarkkuus ja väylästä pohjatietojen laaja ja tarkka tuntemus mahdollistavat teknisesti uuteen käytäntöön siirtymisen. Uudistus lisää joustavuutta väylän tilankäytön hyödyntämiselle ja kasvattaa joidenkin alustyyppien kuljetusten taloudellisuutta ja satamien kilpailukykyä.

Uudistus voi myös muuttaa merenkulun turvallisuusrakenteita, sillä uudessa tilanteessa aluksen päällikön on määriteltävä varaveden riittävyys. Liian pienen marginaalin arvioimisesta riski pohjakosketukselle kasvaa. Päätöksentekoprosessi jouduttaneen ottamaan huomioon myös luotsausta koskevien ohjeistusten uudistamisessa.

Pitkälti näistä lähtökohdista on Merenkululaitoksen toimeksiannosta selvitetty uuteen käytäntöön siirryttäessä erilaisia riskeihin ja riskinhallintaan liittyviä tekijöitä. Työssä on ensin määritelty riskit, etsitty niiden vaikutustapoja ja vaikutusten suuruuksia ja analysoitu myös päätöksentekoprosessin osuutta pohjakosketusriskejä määriteltäessä. Tärkeäksi on nähty myös reaaliaikaisten sää- ja merenpinnankorkeustietojen saatavuus. Tämän VTT:n tekemän selvityksen rinnalla on Merenkululaitoksen omana työnä tehty VTT:n ohjauksessa DI-työ, jossa on verrattu erilaisia käytäntöjä vesisyvyyden ilmoittamiseksi, ja pohdittu vertikaalisen väylätilan riittävyyttä eri tilanteissa. Tehty DI-työ ja tämä selvitys yhdessä antanevat lukijalle hyvän käsityksen uudistuksen vaikutuksista.

Espoo, 28.11.2003

Tekijät

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	4
2	Tutkimuksen tavoitteet ja osatehtävät	5
2.1	Yleistä.....	5
2.2	Hyötyanalyysi	5
2.3	Riskianalyysi.....	5
2.4	Kokonaisvaikutusanalyysi.....	6
3	Riskitekijöiden kuvaus	7
3.1	Väyläsuunnittelun peruskäsitteitä	7
3.2	Vedenpinnan korkeus.....	8
3.3	Riskitekijöiden perusluokat.....	9
3.4	Riskien kartoitus asiantuntijaistunnossa	10
3.5	Erityisriskit talvella	11
3.6	Päätöksentekoprosessi	12
4	Pohjakosketusriskin analyysi.....	14
4.1	Aluksen pystysuuntaiset liikkeet merenkäynnissä	14
4.2	Squat-laskenta	19
4.3	Riskilaskenta	20
4.3.1	Väylä- ja aluskohtainen riski	20
4.3.2	Laskentaesimerkki: Rauman Rihtniemen väylä – ruopattu alue R8.....	24
4.3.3	Laskentaesimerkki: Rauman Rihtniemen väylä – ruopattu alue R6.....	27
4.3.4	Väyläkohtaisten riskitekijöiden merkitsevyysanalyysi	28
4.3.5	Väylästäön kokonaisriski	29
4.4	Päätöksentekoprosessin vaikutusanalyysi	30
4.5	Ympäristövaikutusanalyysi	32
4.5.1	Normaalin operoinnin vaikutukset ympäristöön	32
4.5.2	Onnettomuuksien ympäristövaikutukset	37
5	Tulokset.....	39
6	Johtopäätökset.....	42
	Lähdeviitteet	44
	Liitteet	46

1 Johdanto

Suomessa on perinteisesti ilmoitettu merikartoissa laivaväylille kulkusyvyys eli syväys, joka väylää käyttävällä aluksella saa olla. Nykyisen käytännön mukaan väylille on vahvistettu kulkusyvytydet haraamalla varmistetun vesisyvyyden ja laivaväyliä suunnitteluohjeissa määritellyn varaveden perusteella. Väylän haraamalla varmistettua vesisyvyyttä ei ole kartoilla erikseen ilmoitettu. Tarvittava varavesi vaihtelee tilanne- ja aluskohtaisesti, ja riippuu ennen kaikkea aluksen kulkunopeudesta ja pohjatopografiasta sekä sää- ja merenkäyntiolosuhteista. Nykyinen vahvistetun kulkusyvyyden käytäntö Suomessa on johtanut melko runsaisiin varaveden arvoihin, eikä aluksen kannalta edullisia olosuhteita tai alhaista nopeutta ole voitu hyödyntää. Ainoastaan merenkulkupiirin piiripäällikkö voi edullisissa olosuhteissa myöntää päällikön hakemuksesta alukselle luvan käyttää väylää vahvistettua kulkusyvytyttä suuremmalla syvyydellä.

Kansainvälisen käytännön mukaan väyliä syvyys ilmoitetaan kartoilla pohjatopografian mukaisina minimisyvytyksinä ja aluksen päällikkö arvioi itse varaveden tarpeen. Kulkusyvyyden tai varmistetun vesisyvyyden esittäminen kartoilla on harvinaista, mutta käytäntö vaihtelee jonkin verran maittain erityisolosuhteiden mukaan. Merenkululaitoksen Navi-strategian toteutuminen ja mittaustekniikoiden kehittyminen on mahdollistanut kattavien vesisyvyy- ja pohjatopografiatietojen keräämisen Suomen kauppamerenkulun pääväylästä osalta. Näillä väylillä ollaan siirtymässä kansainvälisen käytännön mukaiseen vesisyvyyden ilmoittamiseen, jolloin väylän vesisyvyyttä käytettäisiin joustavammin. Uuteen käytäntöön on valmius siirtyä jo vuoden 2004 aikana. Suomessa suunnitellaan merkintätapaa, missä kartalla ilmoitettaisiin nykyisen kulkusyvyyden sijaan väylän varmistettu vesisyvyys. Väylän suunniteltu kulkusyvyys ilmoitettaisiin uudessa käytännössä merkitsemällä se väyläkorttiin.

Uudistuksesta hyötyvät lähinnä kauppa-alukset, jotka voivat suotuisissa olosuhteissa lisätä lastinottokykyään. Tällöin esimerkiksi bulkialus, joka käyttää väylän täyttä kulkusyvytyttä, voisi lisätä lastiaan jopa 5-15 prosenttia muutaman kymmenen sentin joustovaralla. Uudella käytännöllä pyritäänkin väyläsyvyyden joustavampaan hyödyntämiseen. Merkittäviä säästöjä voidaan saada myös kompensoimalla joidenkin väyliä syventämistarvetta varaveden joustomahdollisuuksia hyödyntämällä. Syventämistarvetta ilmenee etenkin väylillä, joilla alukset kulkevat tällä hetkellä vajaassa lastissa.

Nykyisin väylän harausyvytydestä, ja lähinnä vain siitä, vastaa väylänpitäjä eli Merenkululaitos. Nykykäytännön heikkouksiin kuuluu mm. se, ettei vastuukysymyksiä ole ollut missään selkeästi mainittuna. Tänä vuonna ilmestyneissä väyläkäsitteiden määrittelyissä asiaa on pyritty selventämään. Oikeustapauksia asiassa ei ole siinä määrin ollut, että voisi sanoa oikeusviranomaisten tulkinnasta asian suhteen mitään. Uudistus antaa aluksen päällikölle lisää harkinta- ja päätösvaltaa; tällöin myös vastuu varaveden tarpeesta siirtyy kokonaan alukselle. Väylän käyttäjä pääsee (joutuu) itse arvioimaan tilannekohtaisesti, paljonko varavettä alus tarvitsee alleen.

Taloudellisilla seikoilla hyvin perusteltuun uudistukseen sisältyy myös riskejä. Pohja-kosketusten todennäköisyys kasvaa, jos varaveden tarve arvioidaan liian pieneksi. Tässä tutkimuksessa arvioidaan riskianalyysimenetelmiä hyödyntäen syvyyskäytännön vaikutusta onnettomuuksien todennäköisyyksiin ja vaikutuksiin. Yhdessä Merenkululaitoksen tekemän hyötyselvityksen kanssa voidaan arvioida uuden syvyyskäytännön kokonaisvaikutuksia.

2 Tutkimuksen tavoitteet ja osatehtävät

2.1 Yleistä

Merenkulkulaitoksen väylien syvyyskäytännön muuttamista koskevassa päätöksessä (18.2.2002) edellytettiin vuoden 2003 aikana tehtäväksi lisäselvityksiä uuden syvyyskäytännön vaikutuksista. Jatkoselvitysten antamien tulosten perusteella tehdään lopullinen päätös uuteen syvyyskäytäntöön siirtymisestä. Vaikutusselvitysten keskeisen osan muodostaa tilaajan tekemä hyötyanalyysi, jossa laaditaan väylittäin kuljetustaloudelliset laskelmat kokonaisyödyn arvioimiseksi. Toisen osan vaikutusarviointia muodostaa tässä raportissa esitetty riskianalyysi. Tämän jälkeen voidaan arvioida syvyyskäytännön muuttamisen kokonaisvaikutusta vertaamalla hyötyjä mahdollisiin kustannuksiin ja riskeihin. Hankkeessa edetään tähdäten siihen, että uusi vesisyvyyden ilmoittamiseen perustuva menettely voidaan ottaa käyttöön vuoden 2004 aikana.

2.2 Hyötyanalyysi

Kuljetustaloudellisessa hyötyanalyysissä määritetään käytettävän laskentamallin periaatteet ja siinä vaikuttavat tekijät. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. aluskokojakauma, kuinka suuri osuus pystyy järjestelmää hyödyntämään, kuinka paljon ja kuinka usein.

Valitaan tarkasteltavat väylät ja selvitetään nykyinen liikenne: liikennemäärät, aluskokojakauma, käytetyt syväydet. Selvitetään liikenteelliset tarpeet syvyyden joustavampaan hyödyntämiseen. Suoritetaan hyötylaskelmat.

Nämä sisältyvät tilaajan tekemään hyötyanalyysiin eikä niitä käsitellä tässä raportissa.

2.3 Riskianalyysi

Tässä tutkimuksessa analysoidaan syvyyskäytännön vaikutuksia onnettomuusriskeihin riskianalyysimenetelmiä hyödyntäen. Tutkimuksen yhtenä tavoitteena on selvittää edellytykset laatia yleislaajuinen riskimalli, jonka pohjalta tarkastellaan uuden väylien syvyyskäytännön vaikutuksia erityisesti pohjakosketusriskeihin. Riskitarkastelun lähtökohdaksi valitaan esimerkkipöytä, jonka suhteen laaditaan yksityiskohtainen riskimalli kyseisen väylän pohjakosketusriskin arvioimiseksi. Esimerkilaskennan pohjalta arvioidaan yleisemmältä riskimallilta vaadittavat ominaisuudet. Yleisessä riskimallissa voidaan olettaa tarkastelun rajautuvan päätöstilanteiden hallintaan, jossa päätöstilanteet määritellään riittävän geneerisiksi.

Väyläkohtaisen riskianalyysin esimerkkipöydänä käytetään tilaajan ehdottamaa Rauman Rihtniemen väylää. Tutkimuksessa pyritään etsimään eri pohjakosketusriskitekijöiden painoarvot. Väyläkohtainen riskimalli parametrisoidaan siten, että muiden väylien pohjakosketusriskit voidaan laskea väyläkohtaisten lähtötietojen pohjalta. Riskitekijöitä ovat aluksen syväys, nopeuspainuma, vedenkorkeus sekä satunnaisaltoilu, joita ei aina voida tarkasti mitata. Lähtöarvojen epätarkkuudet muodostavat teknisen riskitekijän luokan. Riskitekijöitä löytyy myös päätöksentekoprosessissa, joissa tarkinkin tiedon virheellinen

käyttö voi johtaa pohjakosketusvahinkoon. Erityisiä virhelähteitä ovat mittaustiedon prosessointiin liittyvät virheet, kuten syöttövirheet, lukuvirheet, väärinkäsitykset (oikea tieto - väärä alus, oikea tieto - väärä tulkinta). Nämä virheet ovat inhimillisen erehdyksen riskitekijöitä.

Riskianalyysi osatehtävittäin:

1. Kirjallisuusselvitys

Selvitetään mitoituskäytäntöjen samankaltaisuus ja niissä todettujen hyvien suunnittelu- menetelmien soveltuvuus Euroopassa. Tämä osa tutkimuksesta tehdään diplomityönä (Sirkiä, 2003), eikä sitä käsitellä erikseen tässä raportissa. Tähän osaan liittyen järjestetään myös aivoriihi, missä tarkastellaan hankkeen riskejä kvalitatiivisesti.

2. Pohjakosketusriskin arviointi

Selvitetään laskennallisesti Garrisonin menetelmällä ja mitoituskirjallisuudesta löydettävillä SQUAT-laskukaavoilla aluksen staattista ja dynaamista pystysuuntaista liikettä. Pohjakosketusriskiin vaikuttavat myös vesisyvyys ja aluksen syvyyden lähtötietojen tarkkuudet. Eri tekijöiden epävarmuudet otetaan riskimallissa huomioon. Riski lasketaan Monte Carlo -simulointiin perustuen. Lähtötietojen epävarmuuksien syitä pohditaan ja esitetään alustavia toimenpide-ehdotuksia lähtötietojen tarkkuuden parantamiseksi.

3. Ympäristövaikutusanalyysi

Arvioidaan nykyisen käytännön ja uuden käytännön eroa mahdollisessa pohjakosketus- tilanteessa ja eroja ympäristömielessä normaalissa operoinnissa. Tarkastellaan vahingosta aiheutuvia kustannuksia.

4. Päätöksentekoprosessin vaikutusanalyysi

Nykykäytännössä voidaan joustaa tapauskohtaisesti sallitusta kulkusyvyydestä myöntäen poikkeuslupia. Analyysissa otetaan kantaa nykyiseen menettelyyn ja ohjeistukseen sekä uuden käytännön mukanaan tuomiin tarpeisiin.

Riskianalyysin soveltamisen periaate on siis kaksivaiheinen siten että ensin muodostetaan väyläkohtainen konkreettisen esimerkin pohjalta väyläkohtainen riskimalli, jonka laajennettavuutta arvioidaan koko väyläkäytännön uudistuksen tasolla. On huomioitava, että ainoastaan koko väylästä kattava riskianalyysi voidaan kytkeä uuden väyläkäytännön kokonaisuhyötyä arvioivaan hyötyanalyysiin.

2.4 Kokonaisvaikutusanalyysi

Tilaa tekijä tekee kokonaisvaikutusarvion edellä kuvattujen hyöty- ja riskianalyysien perusteella. Siinä arvioidaan, mitä laskelmien ulkopuolelle jääviä hyötyjä ja kustannuksia erilaisine kerrannaisvaikutuksineen syvyyskäytännöstä voi aiheutua. Tässä yhteydessä tulisi pyrkiä arvottamaan myös riskianalyysin tulokset mahdollisesti lisääntyvistä pohjakosketusriskistä ja sen vaikutuksista. Myös vastuukysymykset täytyy selvittää tässä vaiheessa ja luotsauksen ohjeistusta tarkentaa vastaamaan uutta syvyyskäytäntöä.

3 Riskitekijöiden kuvaus

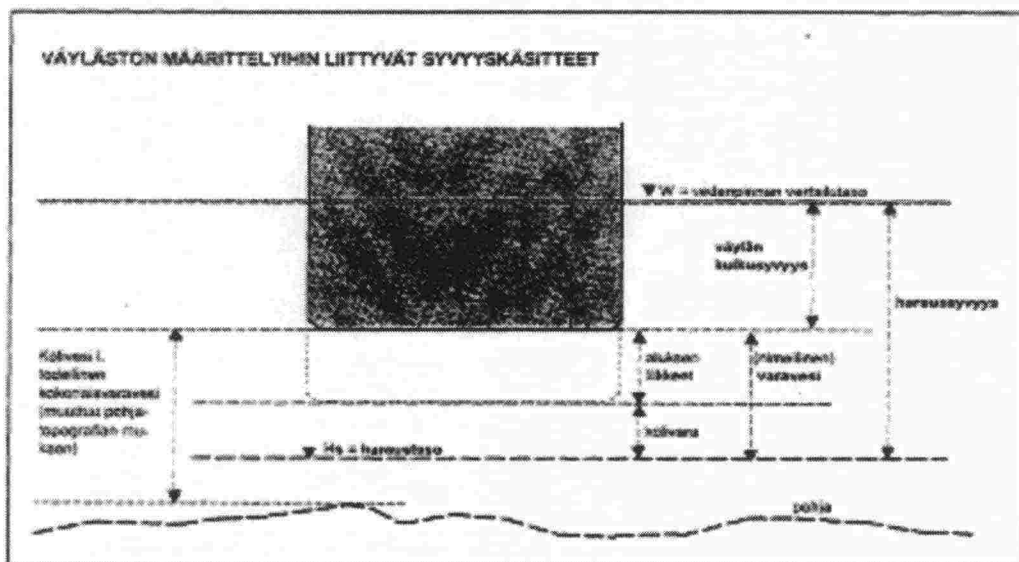
3.1 Väyläsuunnittelun peruskäsitteitä

Väylän tarpeellinen vesisyvyys riippuu aluksen syvyydestä ja nopeudesta, paikallisista aalto-olosuhteista sekä väylän poikkileikkauksesta. Alueilla, joissa aallokko on pientä, voidaan tarpeellinen vesisyvyys määrittää riittävän tarkasti laskennallisesti. Sen sijaan aallokosta aiheutuvan aluksen painuman määrittämiseksi ei ole onnistuttu kehittämään väylän mitoittamiseen soveltuvia laskentamenetelmiä. Varaveden tarve on tällaisessa kohdin arvioitava kokemuksen perusteella. Aluksen todellisen painuman mittaaminen on myös mahdollista aluksen ollessa liikkeessä väylällä. (Merenkulkulaitos, 2001a)

Suomessa väylälle vahvistetaan kulkusyvyys, joka merkitään merikarttoihin väylää kuvaavan viivan päälle sulkeissa. Tämä ilmoittaa suurimman syvyyden, joka väylää käyttävällä aluksella saa olla. Aluksen erilaatuiset painumat sekä kölivara sisällytetään kokonais-varaveteen. Kansainvälisesti on kuitenkin yleisempää, että väylästä ilmoitetaan vain vesisyvyys, ja väylän käyttäjä päättää, mihin syvyyteen alus lastataan. Tällöin aluksen päällikkö arvioi tapauskohtaisesti aluksen painuman ja kölivaran.

Väylän tarpeellinen vesisyvyys muodostuu seuraavista tekijöistä (Kuva 1):

- haraussyvyys
 - väylän kulkusyvyys = aluksen maksimisyväys
 - varavesi
 - aluksen liikkeet
 - kölivara
- maannousu, ja (tai) liettymisvara



Kuva 1. Väylän syvyyden määräytyminen (Merenkulkulaitos, 2002).

3.2 Vedenpinnan korkeus

Kulkusyvyys ja haraussyvyys ilmoitetaan merellä keskivedestä. Teoreettinen keskivesi (MW) on käytännön tarpeita varten tehty ennuste vedenkorkeuden pitkäaikaisesta keskiarvosta (tasmällisemmin odotusarvosta). Siinä on otettu huomioon maan kohoaminen sekä vedenkorkeuden hidask nousu. Näiden muutosten vuoksi teoreettinen keskivesi ei ole vakio, vaan se muuttuu vuosittain. Määritelmän mukainen keskivesi esiintyy kesäaikana vain lyhyen aikaa kevät- ja syystulvien välillä. Käytännössä keskivesi joudutaan usein määrittämään maastomerkeistä. (Ympäristöhallinto, 2002)

Vedenpinnan korkeuden vaihtelut ovat suurin syy nykyisin anottaviin poikkeuslupiin, sillä muutokset ovat heikosti ennustettavissa ja vesi voi pysytellä pitkiäkin aikoja vertailutasen alapuolella. Tärkeimmät Itämeren vedenkorkeuteen vaikuttavat tekijät ovat ilmanpaine, tuuli, virtaus Tanskan salmien läpi sekä merijään kattavuus talvella. Korkea ilmanpaine painaa vedenpintaa alaspäin, tuuli taas vaikuttaa kasaamalla vettä tiettyihin osiin Itämeren ja virtaus Pohjanmereltä vaikuttaa kokonaisvesimäärään. Talven ankaruuden ja vedenkorkeuden välillä on selvä yhteys; mitä laajempi jääpeite on, sitä matalammalla on vedenpinta keskimäärin. Vaihtelut voivat olla suuriakin, tässä tutkimuksessa tarkasteltavana olevalla alueella (Rauman mittauspiste) on mitattu ääriarvot +121 cm (6.12.1986) ja -77 cm (10.4.1934). Mittauksia alueella on tehty vuodesta 1933. Keskimääräinen vedenkorkeus vaihtelee siten, että se on korkeimmillaan joulukuussa ja matalimmillaan huhti-toukokuussa. Tämän taustalla on lähinnä tuulen käyttäytymisen ja ilmanpaineen vuotuinen kierto. (Merentutkimuslaitos, 2003)

Vedenkorkeuden mittaaminen tapahtuu mareografirakennuksessa olevan vaaituspisteen suhteen. Mareografit rekisteröivät vedenkorkeutta automaattisesti ja jatkuvasti. Mareografin alla oleva maa saattaa liikkua, jolloin tämän pisteen korkeus muuttuu. Mareografin vaaituspiste tarkistetaan vuosittain lähellä olevan, peruskallioon sidotun kiintopisteen suhteen. Nämä kiintopisteet ovat sidottuja geodeettiseen korkeusjärjestelmään. Suomen rannikolla on 13 virallista mareografia (Kuva 2). Näiden antama tulostieto on Merentutkimuslaitoksen mukaan merenkulun tarpeisiin riittävä, sillä mihin tahansa pisteeseen rannikolla pystytään laskemaan vedenkorkeus 10 cm tarkkuudella (Merentutkimuslaitos, 2003). Merenkululaitoksen kanta asiaan kuitenkin on, että 10 cm ei ole riittävä tarkkuus merenkulun tarpeisiin.



Kuva 2. Mareografien sijainnit Suomen rannikolla (Merentutkimuslaitos, 2003).

3.3 Riskitekijöiden perusluokat

Syvyyskäytännön muuttamisen keskeinen riskitekijä liittyy pohjakosketusriskiin ja sen mahdolliseen kasvamiseen. Pohjakosketusriskiin vaikuttavat riskitekijät voidaan jakaa kolmeen perusluokkaan:

1. Varavesitarpeen mitoitukseen ja aluksen liikkeiden hallintaan liittyvät riskitekijät.
2. Reunaehtojen arvioinnista aiheutuvat riskit.
3. Päätöksentekoprosessin sisältämät riskit.

L1 Varavesitarpeen mitoitukseen ja aluksen liikkeiden hallintaan liittyvät riskitekijät:

Aluksen vertikaaliliikkeisiin vaikuttaa hyvin monet tekijät. Jos liikkeitä halutaan kuvata matemaattisella mallilla, on tietty todennäköisyyksiin pohjautuva stokastinen malli lähempänä todellisuutta kuin deterministinen malli, eli absoluuttisia arvoja aluksen liikkeille tai edes liikkeiden vaihtelurajoille ei voida esittää, vaan kysymys on aina todennäköisyyksistä. Kun varavesi pienenee, riski/todennäköisyys pohjakosketukselle kasvaa. Toisaalta nopeutta alentamalla voidaan riskiä kompensoida. Yksi osa riskianalyysia on pyrkiä selvittämään näitä teoreettisia, mitoitukseen liittyviä riskejä.

L2 Reunaehtojen arvioinnista aiheutuvat riskit:

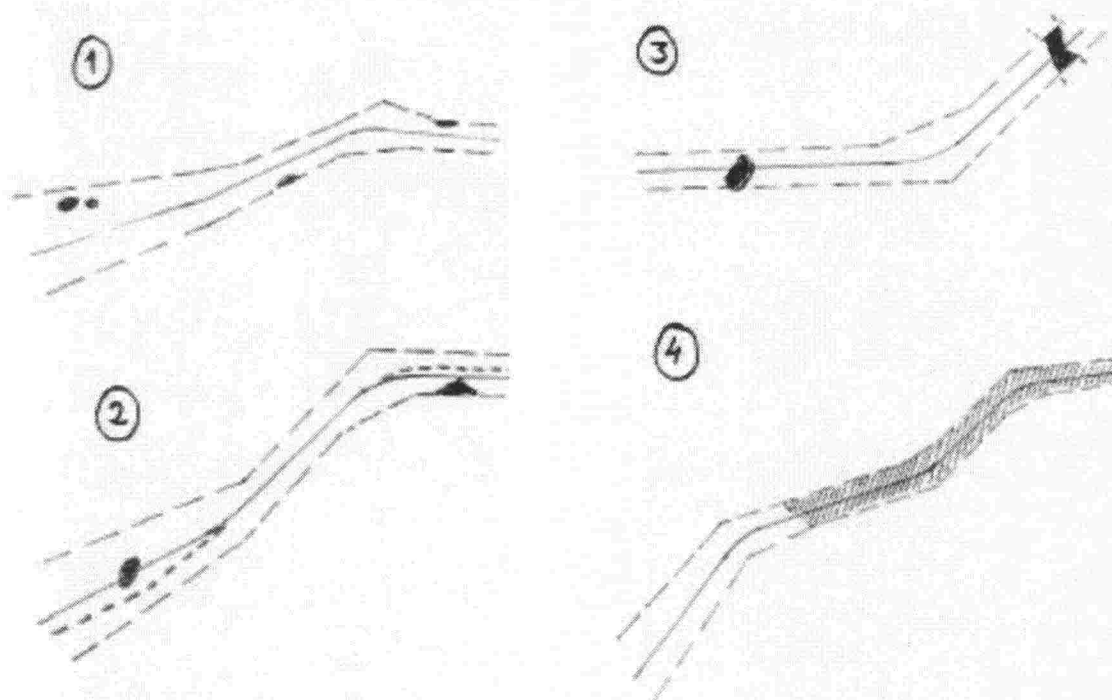
Teoreettisella varavesitarkastelulla päästään tiettyyn varmuuteen varaveden riittävydestä. Todellisuudessa epätarkkuutta ja riskiä lisää se, että tietyt laskelmien lähtöarvo-oletukset (reunaehdot todellisessa tilanteessa) eivät käytännössä sellaisenaan pidä paikkaansa. Esim. vedenkorkeustieto ei pidä paikkaansa (aseman lähtöarvo väärin, muuttuu väyläajon aikana, vedenkorkeus kriittisen matalan kohdalla poikkeaa aseman arvosta), tai alus käyttäytyy eri tavalla kuin laskelman pohjana oleva malli, todellinen käytettävä nopeus on erilainen tai merenkäynti poikkeaa oletetusta.

Kuvat 3 ja 4 kuvaavat väylän matalikkojen sijainteja suhteessa väylän keskilinjaan ja reunoihin. Väylän matalikot hyvin tunteva navigoija pystyy kriittisessä tilanteessa välttämään pohjakosketuksen tilanteessa 2. Sen sijaan tilanteissa 3 ja 4 ei "lisävetä" ole mahdollista hakea väylän keskilinjaan ulkopuolelta. Väyläkohtaista riskimallia laadittaessa oletetaan, että käytännön väyläajo on riskin kannalta tilanteiden 3 ja 4 kaltainen. Näin ollen laadittava riskimalli on konservatiivinen tilanteisiin 1 ja 2 nähden.

L3 Päätöksentekoprosessin sisältämät riskit:

Käytännössä aluksen luotsaus ja navigointi ei perustu yksikäsitteiseen normitukseen, vaan siinä joudutaan soveltamaan, tulkitsemaan ja ennakoimaan monia eri tekijöitä. Uudessa käytännössä tilannekohtainen soveltaminen ja päätöksenteko korostuu. Koko päätöksentekoketjulla on vaikutus siihen, millä syvyydellä alus väylällä kulkee (kuka päättää, missä vaiheessa, mihin tietoihin nojautuen ja millaisten reunaehtojen vallitessa). Kriittisiä päätöksentekovaiheita ovat esim. rahtaaja alusta lastattaessa, luotsi luotsauksen aloittamisesta, päällikkö omalla vastuulla kulkemisesta. Voidaanko näitä tekijöitä ottaa riskianalyysissa millä tavoin huomioon? Teoreettisilla varavesitarkasteluilla ei ole juuri merkitystä todellisten riskien kannalta, jos päätös väylällä kulkemisesta tehdään jollain muilla perusteilla.

Edellä esitetyt riskitekijät vaikuttavat myös nykykäytännössä, mutta eri painoarvoilla. Nykyisessä syvyyskäytännössä jää vähemmän tapauskohtaisen päätöksenteon varaan, ja siten päätöksentekoprosessin sisältämät riskit ovat pienemmät. Tosin mahdollisuus hakemuksesta ylittää kulkusyvyys lisää teoreettista kokonaisriskiä. Lisäksi tulisi ottaa huomioon käytännön menettelytavat siinä, kuinka paljon 'epävirallisesti' joustetaan sallitusta kulkusyvyvyydestä. Syväyksien seurannassa ollaan nykyään alusten omien ilmoitusten varassa. Samoin reunaehtojen arvioinnin riskit vaikuttavat myös nykykäytännössä, mutta koska varmuusmarginaalit ovat lähtökohtaisesti usein suuremmat, reunaehtojen riskivaikutus jää pienemmäksi.



Kuva 3. ja Kuva 4. Yksittäisten matalikkojen sijainti väylällä.

3.4 Riskien kartoitus asiantuntijaistunnossa

Riskien kartoitus toteutettiin Merenkululaitoksella kesäkuussa 2003 asiantuntijaistunnossa, jonka aiheena oli "Uuden väylien syvyyskäytännön mukanaan tuomat riskit". Tähän aivoriiheen osallistui 15 asiantuntijaa merenkulun eri aloilta. Tulokset on kirjattu kattavasti tähän työhön liittyvään diplomityöhön (Sirkiä, 2003). Aivoriihessä tarkasteltiin hankkeen riskejä kvalitatiivisesti. Tuloksena saatiin seitsemän merkittävintä riskiskenaariota, joita käsitellään lyhyesti seuraavassa.

1. Aluksen lisääntynyt syväys (vähentynyt varavesi) heikentävät ohjailuominaisuuksia ja voivat johtaa karilleajo.
2. Miinusvedestä johtuva pohjakosketus väylällä.
3. Liian suuren nopeuden aiheuttama painuma (squat) johtaa pohjakosketukseen väylällä.
4. Lähtötiedoissa olevat epätarkkuudet ja virheet korostuvat.

5. Merenkulkijoilta puuttuu tietoa, jota tarvitaan turvalliseen navigointiin muuttuneessa tilanteessa.
6. Päätöksenteko siirtyy "konttoriin" eli rahtaaaja tekee aluksen syväystä koskevia päätöksiä.
7. Luotsin vastuu kasvaa liialliseksi ja päätöksenteko komentosillalla muuttuu ongelmalliseksi kun selvää viranomaissääntöä ei ole.

Alusten syväydet epäilemättä kasvavat jonkin verran uuden käytännön myötä. Pohjakosketusten määrän pelätään nousevan syväyksien kasvaessa ja varaveden samalla pienentyessä. Toinen varavettä pienentävä seikka on miinusvesi, joka tulisi ottaa huomioon alusta lastattaessa. Myös nopeuspainuma eli squat vähentää varavettä.

Squat-ilmiöllä tarkoitetaan aluksen nopeuspainumaa. Aluksen liikkua sen ympärille syntyy liikesuunnalle vastakkainen virtaus, jonka nopeudesta aiheutuu veden pinnan lasku aluksen ympärillä. Squat aiheuttaa aluksen syvyyden kasvamista, ohjailutehon heikkenemistä ja aluksen kavitoimista. Squatin suuruus riippuu aluksen rungon muodosta ja uppouman täyteläisyysasteesta sekä tietenkin nopeudesta. Nopeuspainuma on suomalaisissa olosuhteissa merkittävin mitoittava tekijä väylän vesisyvyyttä valittaessa.

Kolmen edellisen yhdistyessä (lastataan alus suunnittelussyvyyttä syvempään, vesi on väylällä miinuksella ja nopeuspainumaa ei osata ottaa oikein huomioon) pohjakosketuksen vaara on ilmeinen.

Jos arvioidaan syvyyskäytännön vaikutusta onnettomuusriskiin, se ei välttämättä muodostu pelkästään pohjakosketusriskistä. Aluksen ohjailuominaisuudet heikkenevät entisestään matalassa vedessä squatin vaikutuksesta. Liian pieni varavesi vaikuttaa myös aluksen ohjailtavuuteen, ja sitä kautta lisää karilleajo- ja törmäysriskiäkin. Riskin muutos johtuu lähinnä tapahtumatiheyden kasvusta, seurauksiltaan tapahtumat eivät juuri muutu nykyisestä.

3.5 Erityisriskit talvella

Talvella, jäiden vaikutuksesta, aluksen kulkuvastus kasvaa ja huolimatta suurienkin konetehojen käyttämisestä, aluksella on alhainen nopeus. Varsinkin varaveden ollessa pieni, potkuri ei saa tarpeeksi vettä ja näin imee laivan perää syvemmälle virtausnopeuden kasvaessa laivan alla. Tässä tapauksessa ei ole kyseessä nopeuspainuma, koska aluksen nopeus on tehoista huolimatta alhainen. Painuma kohdistuu aluksen perään.

Toisaalta aaltoilulle "varattu" varavesi jää talvella muuhun käyttöön, sillä jäiden aikaan ei esiinny aaltoilua. Lisäksi sisäsaariston väylät on hyvin murrettu, eikä rännin reuna haittaa potkurin vedensaintia. Vaikka 10 metriä syvällä väylällä olisi jään paksuus 4 metriä, jää alle kuitenkin vielä hyvin vettä.

Ilmiötä on tutkittu jäänmurtajien osalta viitteessä (VTT, 1987). Tie- ja vesirakennushallituksen vesitieosasto suoritti yhteistyössä Merenkulkuhallituksen ja VTT:n laivalaboratorion kanssa jäänmurtajien Urhon ja Kontion perän painumamittauksia kevättalvella 1987 Raahen väylällä sekä Oulun ja Kokkolan edustalla. Mittauksia tehtiin jäänmurtajien ajaessa avatussa väylässä, ajettaessa ahtauman läpi avatussa väylässä sekä jäävallia murrettaessa. Perän painuma muodostui osittain squatista ja osittain jään murtamisen yhteydessä syntyvästä perätrimmistä. Vajoaman maksimiavot olivat (Taulukko 1):

Taulukko 1. JM Urhon ja JM Kontion perän painuman maksimiarvot täysmittakaavakokeissa.

alus	tilanne	nopeus [kn]	vajoama [m]	trimmi [°]	varavesi [m]
URHO					
	avattu väylä	6,5	0,78	-	1,3
	ahtauma	5,5	0,57	-	6 - 1,8
	jäänmurto	2,9	0,55	1	yli 6
KONTIO					
	avattu väylä	6,1	0,55	-	2,3
	ahtauma	7,2	0,55	-	7 - 2,5
	jäänmurto	8,3	1,13	1,6	yli 6

Tuloksia ei suoraan pysty hyödyntämään kauppa-alusten käyttäytymistä arvioitaessa johtuen alusten erilaisesta rungon muodosta perässä.

3.6 Päätöksentekoprosessi

Pohjakosketuskenaario toteutuu, jos varavettä on aluksen kölin alla liian vähän. Varavettä voi olla liian vähän, jos alus on lastattu liian syvään tai käytettävä nopeus on liian suuri (squat kasvaa). Kyseessä on inhimillinen tekijä, joka voi kasvattaa pohjakosketusriskiä.

Tällä hetkellä on voimassa Merenkululaitoksen 14.6.2000 antama luotsausohje, joka tuli voimaan 1.7.2000 (Merenkululaitos, 2000). Ohjeissa todetaan aluksen syvyydestä ja sen vaikutuksesta luotsaukseen seuraavaa:

Aluksen syväys ei saa ylittää väylän virallista kulkusyvyyttä keskivedenkorkeudella.

Luotsilla on kuitenkin oikeus luotsata alusta, jonka syväys ylittää väylän virallisen kulkusyvyuden enintään määrällä, jolla vallitseva vedenkorkeus ylittää keskivedenkorkeuden.

Luotsin on otettava huomioon vedenkorkeuden muutos väylän virallista kulkusyvyyttä vähentävänä tekijänä keskivedenkorkeutta alemman vedenkorkeuden aikana.

Merenkulkupiiri voi erikoistapauksissa aluksen päällikön hakemuksesta myöntää oikeuden ylittää virallinen kulkusyvyys. Lupa voidaan liittää ehtoja.

Nykykäytännössä kulkusyvyuden voi siis aluksen päällikön hakemuksesta ylittää ainoastaan merenkulupiirin piiripäällikön luvalla. Piiripäällikkö tekee päätöksen alus-, väylä- ja olosuhdekohtaisten tietojen perusteella. Poikkeuslupia on myönnetty Suomenlahden ja Pohjanlahden merenkulupiirien alueella vain harvoin. Merenkululaitoksen tilastojen mukaan näitä tapauksia on ollut vain kymmenisen kappaletta käytännön voimassaoloaikana (2000-2003). Järvi-Suomen merenkulupiirissä poikkeuslupia ei myönnetä. Saimaalla vertailutaso on purjehduskauden alivesi ja varavedet ovat normaalisti erittäin suuria, mutta rajoittavana tekijänä on Saimaan kanava, jonka vedenkorkeus ei muutu. Saaristomerellä lupia anotaan ja myönnetään selvästi enemmän; tapauksia on ollut noin 50-80 vuodessa. (Merenkululaitos, 2003).

Alukset lastataan yleensä hiukan alle sallitun kulkusyvyiden, mikäli vedenkorkeus ei ole selvästi yli keskiveden. Mereltä väylälle saavuttaessa on olosuhteista riippuen poikkeuslupia myönnetty miinusveden aikana, mikäli alus on lastattu enintään normaaliin sallittuun kulkusyvyteen. Satamasta lähdettäessä poikkeuslupia ei ole annettu edes miinusvedellä, koska vedenkorkeus voidaan tällöin helposti ottaa huomioon lastattaessa. (Rauma Stevedoring, 2003).

Uuden käytännön astuessa voimaan tämä päätöksentekoprosessi muuttuu. Vastuu ja valta väylällä käytettävästä syvyydestä siirtyisi pois viranomaisilta. Asiantuntijaistunnossa uuden syvyyskäytännön tuomista haitoista merkittävimmäksi nousi nimenomaan se, että päätökset aluksen syvyydestä tehdään jossain muualla kuin aluksella. Riskiskenaariona nähtiin uuden käytännön mukanaan tuoma mahdollisuus, että aluksen lastaussyvyys saatetaan päättää varustamon konttorissa Atlantin toisella puolella kaksi viikkoa ennen saapumista väylälle.

Tärkein keino torjua päätöksenteossa tapahtuvia virheitä on vastuukysymysten selvittäminen. Koska aluksen päällikkö on viime kädessä vastuussa aluksesta, pitäisi päällikön voida tehdä päätös lastin määrästä ilman rahtaajan painostusta. Päälliköllä pitäisi olla myös todellinen mahdollisuus jäädä yllättävällä miinusvedellä odottamaan vedenkorkeuden muutosta. Myös luotsilla pitää olla todellinen oikeus kieltäytyä luotsaamasta alusta, joka on lastattu liian syvään. Pelko siitä, että aluksen syvyyttä koskevat päätökset tehdään jossain muualla kuin aluksella ja nimenomaan taloudellisista syistä, saattaa olla aiheellinen. Pohjakosketuksen vaara on suuri, jos uuden käytännön mahdollistaessa haetaan alukselle maksimisyvyyttä kunnes se löytyy.

Nykykäytännön vastuukysymykset ovat kuitenkin hyvin epäselviä ja säädösten vastuukysymyksiä tulisikin tarkentaa. Nykyisessä systeemissä MKL vastaa kulkusyvyydestä normaaliolosuhteissa. Nämä "normaaliolosuhteet" ovat lähes yhtä vaikea asia määrittää juridisesti kuin "hyvä merimiestapa".

Uuteen käytäntöön siirtymisen edellytyksiä kannattaa pohtia päätöksentekoprosessin kannalta. Olisiko lisäkoulutukselle tai laskentatyökaluille aluksilla tarvetta? Alusten päälliköiden tulee saada tarpeeksi informaatiota olosuhteista päätöksenteon tueksi. Suunniteltu käytäntöhän on jo muualla maailmassa käytössä, eli asiassa ei sinänsä ole varustamoille mitään uutta. Suomen satamiin johtavat väylät ovat toki haastavampia kuin muualla keskimäärin. Vedenkorkeuden nopeat vaihtelut eivät Suomessa ole suuria kun vuorovesi-ilmiötä ei juuri esiinny. Tässä riskianalyyseissa testataan laskentatapoja pohjakosketusriskin muutoksen selvittämiseksi Rauman Rihtniemen väylällä ja selvitetään, voitaisiinko näitä laskentamenetelmiä käyttää yleisemminkin päätöksenteon tukena aluksilla.

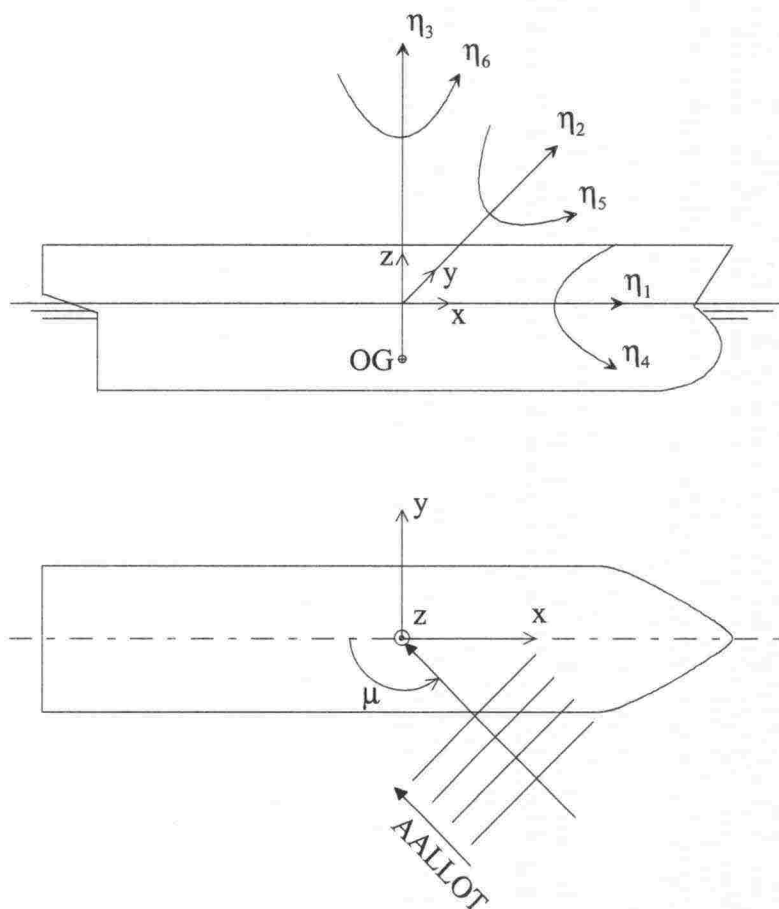
Luvussa 4.4 on esitetty riskimalli päätöksentekoprosessiin liittyvistä riskitekijöistä. Vanha ja uusi syvyyskäytäntö mallinnetaan kaksivaiheisena päätöksentekoprosessina, jossa ensin suoritetaan tilannearvio jonka jälkeen tehdään varsinainen päätös väylän käytöstä.

4 Pohjakosketusriskin analyysi

4.1 Aluksen pystysuuntaiset liikkeet merenkäynnissä

Aluksen liikuessa merenkäynnissä aalloista aiheutuvat pystysuuntaiset liikkeet voivat kasvattaa pohjakosketusriskiä. Pystysuuntainen liike riippuu laivan kuuden vapausasteen liiketilasta. Liikkeiden suuruus riippuu pääasiassa aluksen päämitoista ja nopeudesta sekä vallitsevasta merenkäyntitilanteesta. Aluksen liikkeisiin vaikuttaa myös vedensyvyys, eli aluksen käyttäytyminen aallokossa on erilaista syvässä ja matalassa vedessä.

Ennuste aluksen pystysuuntaiselle liikkeelle aallokossa on määritetty lineaariseen teoriaan pohjautuvilla menetelmillä. Kaikki kuuden vapausasteen liikkeet on ensin määritetty säännöllisessä aallokossa eri aallon pituuksilla ja aallon kohtauskulmilla. Kuuden vapausasteen liikkeet ja aallon kohtauskulman määritelmät on esitetty kuvassa 5. Laskettujen liikkeiden avulla saadaan määritettyä pystysuuntaiset liikkeet erikohdissa laivaa. Säännöllisen aallokon tuloksista päästään edelleen epäsäännöllisen aallokon tuloksiin aaltospektrin avulla.



Kuva 5. Aluksen kuuden vapausasteen liikkeet; η_1 työntyily (surge), η_2 huojunta (sway), η_3 kohoilu (heave), η_4 keinunta (roll), η_5 jyskintä (pitch), η_6 mutkailu (yaw). Liikkeet on määritetty koordinaatiston origossa, joka sijaitsee vesiviivalla ja pysty akseli kulkee aluksen painopisteen kautta. Aallokon kohtauskulma on μ , 180 astetta on vasta-aallokko.

Aluksen liikkeet säännöllisessä aallokossa on laskettu kolmidimensionaalisella radiaatio-diffraktio-menetelmään perustuvalla merikelpoisuushjelmalla (Garrison, 1980). Ohjelmassa aluksen vedenalainen runkogeometria mallinnetaan paneeleilla. Jokaisen paneelin keskipisteessä lasketaan nopeuspotentiaalit joiden avulla saadaan määritettyä paineet ja edelleen kokonaisvoimat, jotka kohdistuvat aluksen runkoon. Nopeuspotentiaalit ratkaistaan Greenin funktion avulla. Koska tässä työssä on vedensyvyys alhainen verrattuna aluksen syvyyteen, niin laskennassa on käytetty matalan veden Greenin funktiota. Hydrodynaamisten voimien ja aluksen massa suureiden avulla saadaan liikeyhtälöön kertoimet ja herätevoimat, jotka aiheutuvat aallokosta. Aluksen nopeus on otettu huomioon liikeyhtälön kertoimissa. Liikeyhtälöstä saadaan ratkaistua aluksen kuuden vapausasteen liikkeet. Liikkeet on määritetty eri aallon taajuuksille ja aallonkohtauskulmille. Kuuden vapausasteen liikkeistä saadaan määritettyä pystyliike tietyissä kohtaa laivaa. Jokaiselle pisteelle laivassa ja eri aallon kohtauskulmille saadaan siten määritetty oma pystyliikkeen siirtofunktio.

Pystyliikkeet epäsäännöllisessä aallokossa saadaan määritettyä lineaarisella superpositio-periaatteella. Vastespektri epäsäännöllisessä aallokossa on

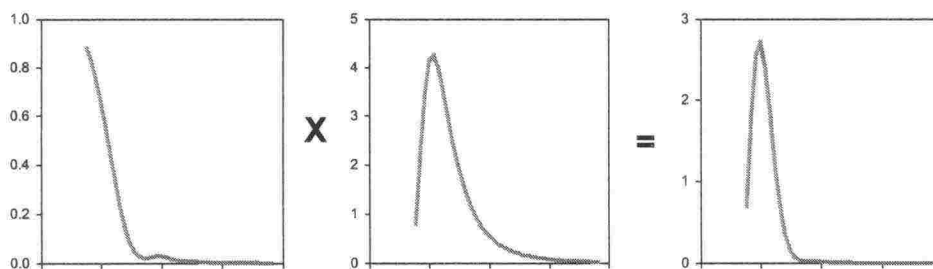
$$S(\omega) = |H(\omega)|^2 S_w(\omega), \quad (1)$$

missä $H(\omega)$ on säännöllisen aallokon siirtofunktio, $S_w(\omega)$ on aaltospektri ja ω on aallontaajuus. Periaate lineaarisesta superpositiomenetelmästä on esitetty kuvassa 6.

Vasteiden tilastolliset suureet saadaan määritettyä vastespektristä. Vastespektrin nollasmomentti on yhtä suuri kuin prosessin varianssi

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega, \quad (2)$$

missä $S(\omega)$ on vastespektri. Varianssin avulla saadaan keskihajonta $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$. Keskihajonta on yhtä suuri kuin prosessin rms-arvo (root-mean-square) kun keskiarvo on nolla. Tässä tapauksessa kaikki liikkeet tapahtuvat sinimuotoisina liikkeinä keskiarvon molemmiin puolin, joten keskiarvo on nolla. Lisäksi voidaan olettaa, että liikkeiden huippuarvot noudattavat Rayleigh-jakautumaa. Tällöin huippuarvojakautuman määrittää suoraan vasteen keskihajonta (tai varianssi). Näiden avulla saadaan määritettyä edelleen esimerkiksi ennusteet ääriarvoilla. On huomattava että kun vastespektrille tehdään kapeakaistaoletus tulevat liikeamplitudit kasvamaan leveäspektriseen vastespektriin nähden. Kapeakaistaoletus on näin ollen riskiin nähden konservatiivinen.



Kuva 6. Periaatekuva kuinka aluksen vasteet määritetään epäsäännöllisessä aallokossa. Kuvassa on vasemmalta oikealle siirtofunktio, aaltospektri ja vastespektri.

Pystyliikkeiden laskennan lähtötiedot

Alustiedot

Pystyliikkeiden laskennassa on käytetty tuotetankkeria, jonka päämittoja on skaalattu affiinisesti vastaamaan syväydelään 10 m ja 8 m aluksia. Molempien versioiden päämitat on esitetty taulukossa 2. Taulukossa on myös esitetty vedensyvyys-aluksensyväys suhteet. Vedensyvyys on ollut laskennassa $h = 10.7$ m molemmille aluksille.

Syväydelään 8 metrin alukselle on pystyliikkeet laskettu nopeudella $U = 10$ solmua. Syväydelään 10 metrin alukselle on laskettu pystyliikkeet 10 solmun nopeuden lisäksi myös nopeuksilla 6 ja 12 solmua. Vedensyvyyden Frouden luvut ovat 6, 10 ja 12 solmun nopeuksille $F_{nh} = V/\sqrt{gh} = 0.30, 0.50$ ja 0.60 . Pystyliikkeet on laskettu perässä ja keulassa. Sivusuunnassa perän ja keulan pisteet ovat olleet keskiviivalla.

Taulukko 2. Laskennassa käytettyjen kahden aluksen päämitat.

			T = 10 m	T = 8 m
Pituus	L_{PP}	m	161.4	129.1
Leveys vesiviivalla	B_{WL}	m	25.2	20.1
Syväys	T	m	10.0	8.0
Uppouma	∇	m ³	32399	16588
Pitkittäinen hitaussäde ⁽¹⁾	k_{yy}	m	40.35	32.28
Poikittainen hitaussäde ⁽²⁾	k_{xx}	m	8.82	7.04
Pitkittäinen painopiste	L_{CG}	m	82.20	65.76
Pystysuuntainen painopiste	V_{CG}	m	8.54	6.83
Vedensyvyys/aluksensyväys	h/T	–	1.07	1.34

(1) $0.25 \times L_{PP}$

(2) $0.35 \times B_{WL}$

Aaltotilastot

Säännöllisessä aallokossa liikkeet on laskettu eri aallontaajuuksilla ja viidellä eri aallon kohtauskulmalla ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ja vasta-aallokko 180°). Epäsäännöllistä aallokkoa on kuvattu Jonswap-aaltospektrillä (ITTC, 2002). Eri merenkäyntitilojen esiintymistodennäköisyydet saadaan merialueella tehtyjen aallokon mittausten avulla, jotka on ns. aaltoskatterina, missä on eri aallon korkeuksien ja periodien esiintyminen tiettyinä ajanjaksona.

Eri merenkäyntitilanteiden vaikutusta ja esiintymistodennäköisyyttä on tarkasteltu erikseen Rauman väylälle ja merenkäyntitilastoina on käytetty Sandbäckin alueen aaltotilastoja. Aaltotilastot perustuvat Merentutkimuslaitokselta saatuihin tietoihin. Aaltotilastot on esitetty liitteessä 1, missä on eri merenkäyntitilanteet esitetty merkitsevän aallonkorkeuden H_s ja aallon periodin T_p avulla. Skatteri esittää näiden merenkäyntitilanteiden esiintymislukumäärän

viiden vuoden ajalta. Liitteessä on esitetty myös eri tuulen suuntien esiintymistodennäköisyydet Sandbäckin alueella. Tyypillisimmät tuulet ovat etelän suunnalta.

Liitteessä 1 on esitetty myös Sandbäckin alueen merkitsevien aallon korkeuksien H_s ja aallon periodeiden T_p todennäköisyysjakautumat. Kuvista nähdään tyypillisimmät merenkäyntiolosuhteet. Esimerkiksi noin 90 % aalloista on alle 2 metriä korkeita ja tyypillisimmät aallon periodit ovat noin 4 s.

Pystyliikkeiden laskennan tuloksia

Alusten pystyliikkeet säännöllisessä aallokossa

Siirtofunktiot eri aallokon kohtauskulmille aallon taajuuden funktiona on esitetty liitteessä 2 syväydeltään 8 metrin alukselle 10 solun nopeudella sekä 10 metrin syväyden alukselle nopeuksilla 6, 10 ja 12 solmua. Kaikissa tapauksissa veden syvyys on 10.7 metriä. Siirtofunktiot on annettu dimensiottomassa muodossa z_a/a , missä a on aallon amplitudi. Aallontaajuus on ω . Kuvista nähdään, että aluskoon pienentyessä huippuarvot siirtyvät suuremmille taajuuksille eli lyhyemmille aallonpituuksille. Kuvista on pääteltävissä, että 10 m syväydellä ja 10 kn nopeudella liikkuva alus toteuttaa suuria pystysuuntaisia liikkeitä erityisesti 45 asteen myötätuulessa. Tällainen on tilanne esim. Rauman väylää sisään ajettaessa.

Alusten pystyliikkeet epäsäännöllisessä aallokossa

RMS-arvot eri aallokon kohtauskulmille aallon periodin funktiona on esitetty liitteessä 3 syväydeltään 8 metrin syväyden alukselle. Liitteen 3 kuvissa on myös RMS-arvot 10 metrin syväyden alukselle nopeuksilla 6, 10 ja 12 solmua. Kaikissa tapauksissa veden syvyys on 10.7 metriä. RMS-arvot on esitetty yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle H_s . Koska käytetyt menetelmät perustuvat lineaariseen teoriaan niin muut aallon korkeudet saadaan suoraan skaalaamalla halutulla aallon korkeudella. Aallon periodina on aaltospektrin huippuperiodi T_p .

Edellä esitetyt tulokset 8 ja 10 metrin tuotetankkerille ovat sovellettavissa eri merialueille. Rajoittavana tekijänä on ainoastaan veden syvyys, joka on ollut laskennassa 10.7 metriä.

Esitetyt aaltotilastot eivät täysin anna oikeaa kuvaa aallokosta Rauman sisääntuloväylällä. Väylän avomeren alkuosaa lukuun ottamatta, väylä on saariston suojassa ja matalassa vedessä. Sandbäckin aaltotilastot perustuvat syvään veteen ja suhteellisen avoimeen merialueeseen. Aallonkorkeuteen ja periodiin vaikuttaa matalavesi, sekä myös saaret ja pohjamuoto. Lisäksi vastespektrin laskenta epäsäännöllisessä aallokossa perustuu standardiaaltospektriin. Aallokon lyhytharjaisuutta, eli kuinka aallot tulevat eri suunnista eikä vain yhdestä vallitsevasta suunnasta, ei ole myöskään otettu huomioon.

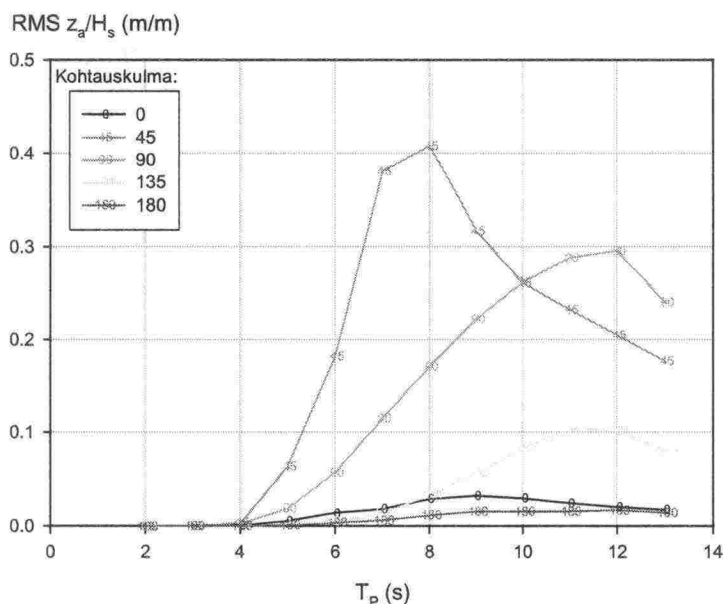
Tyypillisesti lyhytharjaisessa aallokossa liikkeet tasaantuvat eri aallon kohtauskulmille. Tällöin esimerkiksi vasta-aallokossa kohoilu ja jyskintä liike pienenevät ja sivuaallokossa kasvavat. Tästä seuraa, että tulokset ovat konservatiivisia vasta- ja peräaallokossa mutta ei-konservatiivisia sivuaallokossa. Peräntakaisessa (45°) ja keulavastaisessa (135°) merkitys voi olla suhteellisesti pienempää kuin esimerkiksi vasta-aallokossa. Lyhytharjaisuuden vaikutus voi joko kasvattaa tai pienentää pohjakosketusriskiä peräntakaisessa ja keulavastaisessa aallokossa.

Keinunnan aiheuttama pystyliike

Liitteessä 4 on esitetty RMS-arvot keinunnan aiheuttamalle pystyliikkeelle aluksen palteitten kohdalla yksikön suuruiselle merkitsevän aallon korkeudelle 8 sekä 10 metrin syväyden omaaville aluksille.

Liitteen 4 kuvista havaitaan esimerkiksi 45 asteen kohtaamiskulmalla laskennan rajoituksesta johtuen (viskoosivaimennuksen puuttuminen), että RMS-arvot nousevat "hallitsemattomasti" arvoihin, jotka eivät ole todellisia. Ilmiö pätee erityisesti 45 ja 90 asteen kulmille, jotka juuri kuvaavat keinunnan liikettä. Esimerkiksi 8 metrin syväydellä tulosten luotettavuus häviää aaltospektrin huipun kulmataajuudella 4 sekunnin kohdalla (Kuva 7). Syvemmällä, 10 metrin syväydellä, tulokset 45 asteen kohtaamiskulmille ovat luotettavia vielä 6 s aallon huipputaajuudelle, kun taas 90 asteen kohtaamistaajuuden luotettavuusraja laskentamenetelmästä johtuen on noin 10 sekunnin taajuus (kuvat liitteessä 4). Näitä arvoja tarkasteltaessa todetaan keinunnan arvot kohtaamiskulmilla 45 ja 90 kuitenkin liian suuriksi suuremmilla aaltospektrin huipputaajuuden arvoilla. Tämä näkyy hyvin laskennan siirtofunktioista.

Esimerkiksi Sandbäckin alueella aallot, joiden ominaisperiodi yli 10 s ovat erittäin harvinaisia, joten sivuaallokon tulokset (90 astetta) ovat siten käyttökelpoisia ja antavat hyvän ennusteen aluksen palteitten pystyliikkeistä. Molemmissa kuvissa nähdään sekä 45 että 90 asteen kohtaamisissa tuloksissa piikkiarvot, jotka edustavat keinunnan resonanssiarvoja. Vaikka tuloksia ei voi käyttää numeerisina arvioina hyödyksi, on tieto resonanssin taajuustasosta tässä tärkeä. Merkitsevämmäksi nousee yleensä aluksen kallistuminen kaarteessa, ja erityisesti kaarrekallistuma tilanteessa, jossa käännökseen on lähdetty liian myöhään.



Kuva 7. RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 8 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.

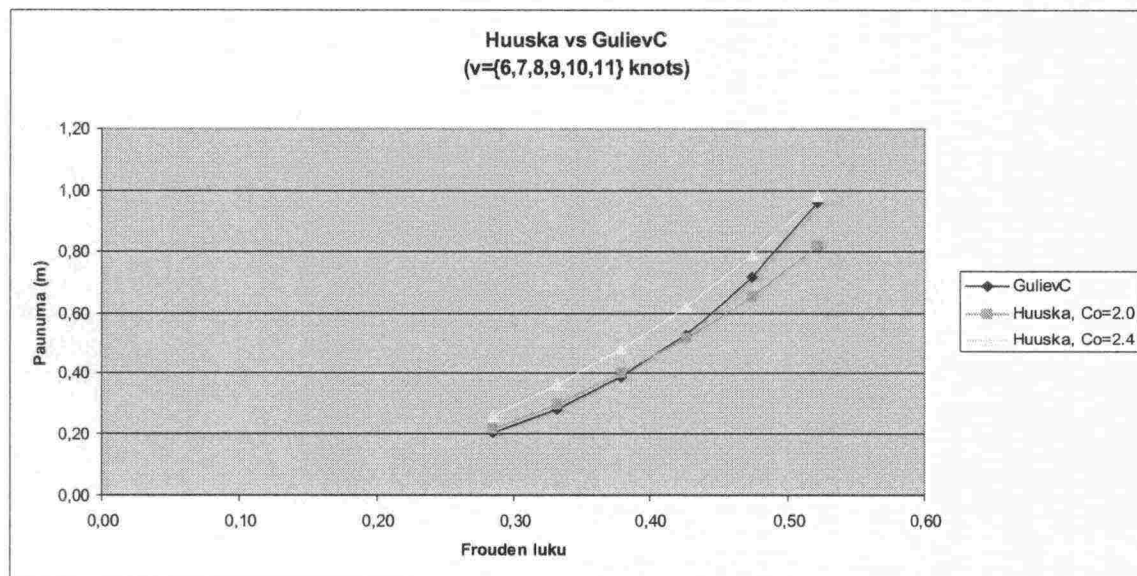
4.2 Squat-laskenta

Squat-laskennan yleisemmin käytettyjä kaavoja on esitetty viitteessä (Sirkiä, 2003). Oleellinen tekijä kaavan valinnassa on väylägeometria. Mikäli väylän ja aluksen poikkipinta-alojen suhde on suuri, voidaan perustella Huuska-Icorels kaavan käyttöä. Huuska-Icorelsin kaava on:

$$s(v) = d C_0 C_b \frac{B}{L_{pp}} \frac{F_{rn}(v)^2}{\sqrt{1 - F_{rn}(v)^2}} \quad (3)$$

ja sovellusehto on $B/L_{pp} < 0,16$, $C_b \leq 0,75$. Ro-ro aluksilla $C_0 \approx 2,4$. L_{pp} on vesilinjan pituus ja on ro-ro -aluksilla käytännössä sama kuin aluksen pituus L .

Seuraavassa kuvassa (Kuva 8) on vertailtu Huuska-Icorelsin mukaista squat-käyrää parametriarvoilla $C_0=2,0$ ja $C_0=2,4$. Lisäksi kuvaan piirretty GulievC – käyrä. Huomataan että H-I ($C_0 = 2,4$) antaa suuremman arvon tarkasteltavalla nopeusvälillä $v=6 - 11$ kn.



Kuva 8. Squat-käyriä Huuska-Icorelsin - ja GulievC-laskentaperiaatteisiin perustuen.

SQUAT-käyrä tulkitaan maksimikäyräksi parametriarvolla $C_0=2,4$ eli tuotetankkerin todelliset squat – arvot eivät ylitä kaavan (3) arvoja.

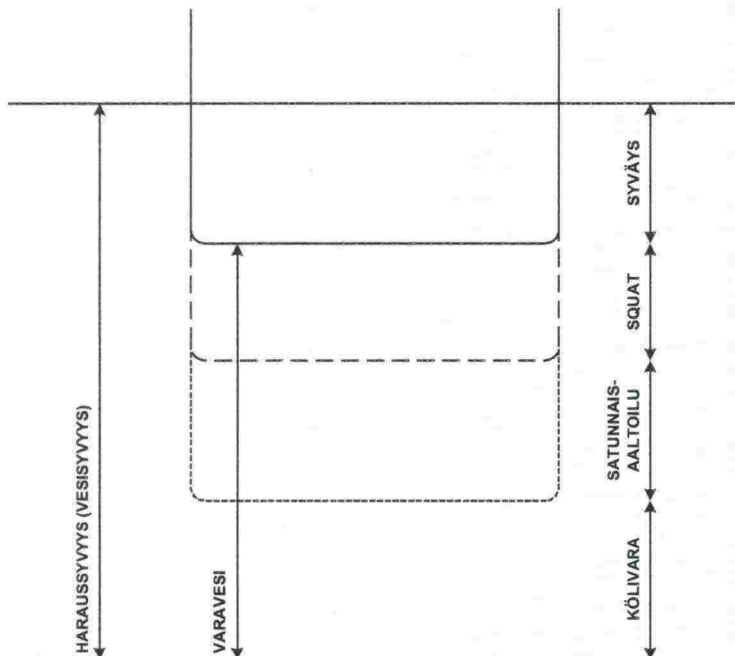
4.3 Riskilaskenta

4.3.1 Väylä- ja aluskohtainen riski

Riskianalyysissa on lähdetty mallintamaan väylä- ja aluskohtaista riskiä. Tarkoituksena on tämän perusteella arvioida mahdollisuuksia yleistää malli siten että koko kauppamerenkulun väylien kokonaisriski uuteen väyläkäytäntöön siirryttäessä olisi laskettavissa.

Väyläkohtainen riski määritellään pohjakosketuksen todennäköisyytenä. Pohjakosketus 'tapahtuu' kun haraustaso ylittyy. Vaikka kölivettä on mahdollisesti vielä jonkun verran, niin nopeuspainuman hetkellisen kasvun myötä (noste katoaa hetkellisesti) alus kosketta pohjaa.

Väylän syvyyskäsitteitä:



Pohjakosketusriski määritellään kölivaran suhteen (ei köliveden suhteen):

Merkinnät:

y	Vesisyvyys
d	Syväys
$s(v)$	Painuma alustyyppille I nopeuden v funktiona, $v \in [v_{min}, v_{max}]$
z	Satunnaisaaltoilun huippuarvo
u	Ohjailukallistuma
x	Kölivara

Stokastiset suureet: $y, d, z, u, x(d, z, s)$ s.e. d, z ja u ovat riippumattomasti jakautuneita.

Jakaumat $p_Y(y)$, $p_D(d)$, $p_H(h)$, $p_U(u)$ on määriteltävä, jakauma $p_X(x)$ on estimoitava simuloimalla.

Määritellään *alustyyppi- ja olosuhdekohtainen* (I) pohjakosketusriski nopeusparametrillä v :

$$R(v, I) = \Pr\{X \leq 0; v, I\} = \int_{-\infty}^0 p_X(x; v, I) dx \quad (4)$$

$$X = W - D - s - Z - U$$

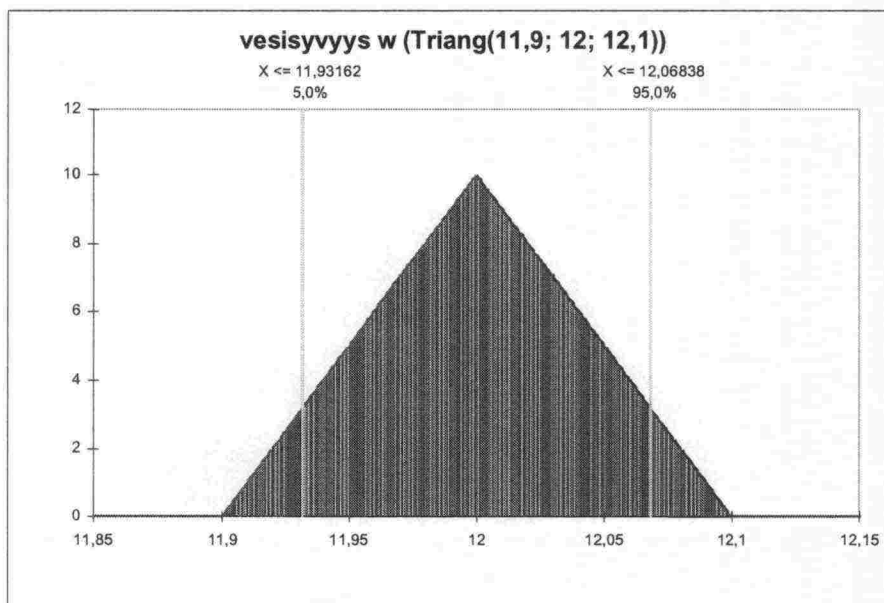
Tämä edellyttää että on määritelty $p_W(w)$, $p_D(d)$, $p_Z(z)$, $p_U(u)$, $s(v)$, v , I . Squat $s(v)$ on käsitelty luvussa 4.2.

$p_W(w)$:

Jakauma kuvaa paikallista vaihtelua mareograafisen vesisyvyydestiedon suhteen. Mittauspisteen ja väylällä vallitsevat vesisyvyydet eivät ole samansuuruiset, kuitenkin positiivisesti korreloituneita keskimääräiseen vesisyvyyden suhteen. On oletettavaa, että jakauma on määritettävä asiantuntija-arvioilla. Asiantuntijoilta voidaan kysyä maksimipoikkeama mareograafiseen tietoon nähden. Näin ollen voidaan jakaumatyyppiä määrittää kolmiojakauma, jonka moodi on ilmoitettu vesisyvyys ja ääriarvot esimerkiksi symmetriset moodin ympäsi.

Esimerkki:

vesisyvyys (mareografinen tieto)	μ_y	12,0
paikallisyvaihtelu (max)	δ_y	0,1



$p_D(d)$:

Syväys lastin funktiona on periaatteessa tarkasti laskettavissa. Käytännössä syväys luetaan aluksen syväysviivoista, jotka ovat 10 cm välein. Näissä voi kuitenkin olla epätarkkuuksia ja lastin epätasainen sijoittaminen saattaa aiheuttaa kallistumia. Voidaan kuitenkin olettaa että maksimipoikkeamat ovat ± 5 cm. Ellei syväyksen jakaumaa voida tilastollisesti estimoida voidaan se määrittää asiantuntija-arvioin. Käyttökelpoinen jakaumamuoto on tällöin kolmiojakauma (ks. edellinen esimerkki).

Esimerkki:

syväys (ilmoitettu tieto)	μ_y	10,0
mittauksen epävarmuus (max)	δ_y	0,05

Satunnaispystyliikkeellä tarkoitetaan absoluuttista pystysuuntaista liikettä tietyssä kohtaa laivaa. Pystysuuntainen liike riippuu laivan kuuden vapausasteen liiketilasta (laivan 6 dof liikkeitä ovat työntyily, heilunta, kohoilu, keinunta, jyskintä, mutkailu (engl. surge, sway, heave, roll, pitch, yaw)). Syvyys-suuntaisen pystyliikkeen amplitudi on satunnaismuuttuja. Pystysuuntaisten liikkeiden lukumäärä riippuu tarkasteltavan matkan (esim. matalikon) pituudesta, aluksen nopeudesta, kulkusuunnasta ja liikkeiden ominaisperiodeista. On huomattava, että aallokon ominaisperiodin ollessa lähellä laivan keinunnan ominaisperiodia saattaa pystysuuntaisen liikkeen maksimi tietyissä olosuhteissa esiintyä aluksen rungon palteissa jolloin z lasketaan keinuntaa kuvaavasta vastespektristä.

Jos lukumäärä on k on ratkaisevaa onko maksimipystyliike $z_m = \max\{z_1, \dots, z_k\}$ sellainen että jäljellä oleva kölivara ylittyy. Jos vastespektri on kapeakaistainen on maksimipystyliikkeen todennäköisyysfunktio $P(z_m < z) = F^{Ra}(z; m_0)^k$, missä m_0 on Rayleigh-jakauman $F^{Ra}(\cdot)$ parametri ja vastaa vastespektrin 0-momenttia sekä on myös 'pystyliike- prosessin' varianssi. Rayleigh-jakauma on kuitenkin syytä katkaista asiantuntija-arvioiden perusteella tietyn ääriarvon kohdalla.

$p_U(u)$:

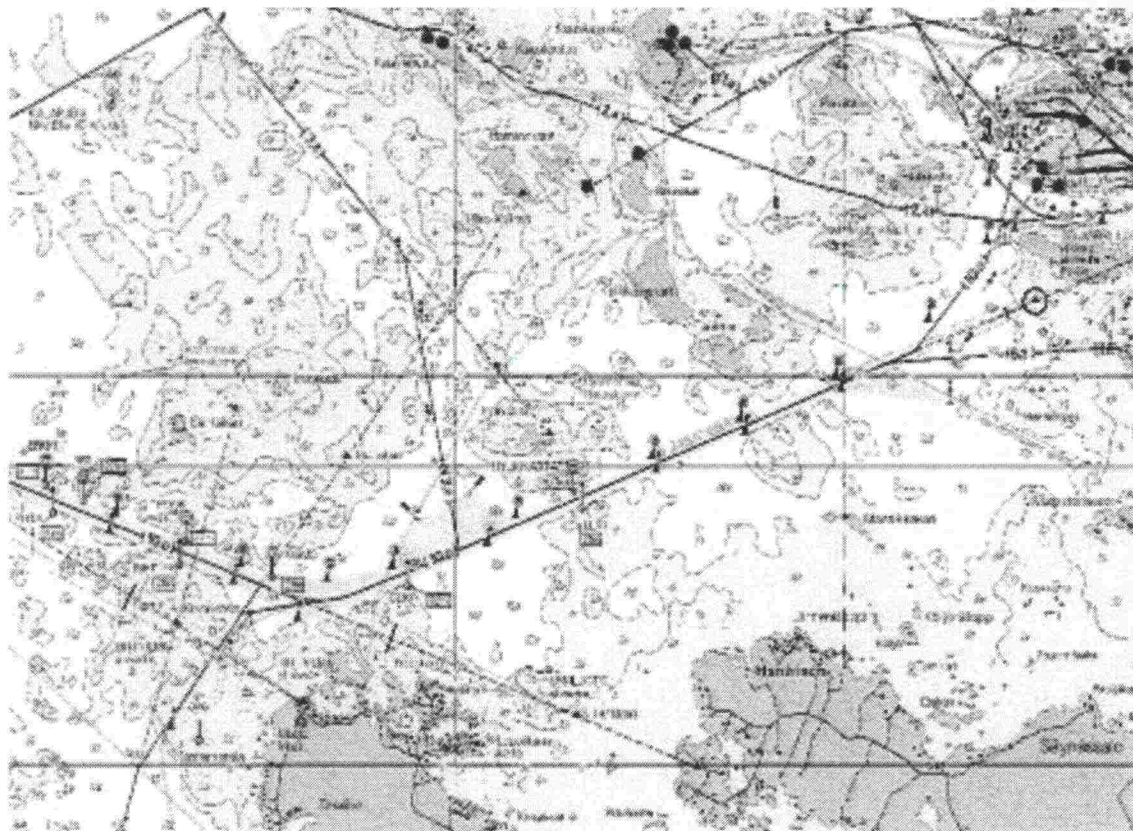
Laivan kääntymisestä väylän mutkissa aiheutuu myös kallistumista. Käännöksen alkuvaiheessa laiva kallistuu käännöksen sisäpuolelle peräsinvoiman vaikutuksesta. Käännöksen jatkuessa keskipakoisvoima kallistaa laivaa käännöksen ulkopuolelle. Käännöksen aiheuttaman kallistuskulman suuruus riippuu laivan alkuvakavuudesta ja nopeudesta sekä käännöksen tiukkuudesta.

Tyypillisesti tankki- ja irtolastilaivoilla on suuri alkuvakavuus (GM) ja siten ne myös kallistuvat käännöksissä vähän. Laivoilla, jotka kuljettavat ns. tilavuuslastia (Roro- ja konttilaivat), on huomattavasti tankkilaivoja pienempi alkuvakavuus ja ne voivat kallistua tiukoissa käännöksissä useita asteita. Ilmiö on puhtaasti laivakohtainen ja myös lastitilanteesta riippuva (Oltmann, 1993).

Rauman Rihtniemen väylä - esimerkkilaskentojen kohde

Merenkululaitos teetti kesällä 2003 kyselytutkimuksen, jossa selvitettiin väylien syvyyskäytännön muuttamisen tarpeet ja taloudellinen merkitys Suomen satamien näkökulmasta (Merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskus, 2003). Kyselytutkimuksen perusteella potentiaalisia kohteita tarkempaan jatkoselvitykseen olisivat ainakin Rauma, Uusikaupunki (Kemira), Hamina, Loviisa, Förby ja Kalajoki. Vastauksien perusteella valittiin tähän jatkotarkasteluun Rauman Rihtniemen väylä (Kuva 9). Rauma on jossain määrin erityistapaus, koska siellä uutta käytäntöä pystyisi hyödyntämään linjaliikenne, mikä lisää saavutettavaa kuljetustaloudellista hyötyä.

Rauman satamaliikenne on viisinkertaistunut noin kahdessakymmenessä vuodessa, ollen vuonna 2002 5,7 miljoonaa tonnia. Sataman liikenteen kasvaessa on havaittu, että satamassa käyvä laivamäärä ei ole juurikaan lisääntynyt, sen sijaan aluskoko kasvaa jatkuvasti. Sataman kehittämisen yhtenä tärkeänä edellytyksenä ovat turvalliset, toimivat ja riittävän syvät meriväylät. Satamaan johtaa kaksi väylää, Rihtniemen (10,0 m) ja Valkeakaran (7,5 m) väylät. Toiminta- ja kasvuedellytysten turvaamiseksi sekä kuljetustaloudellisten säästöjen aikaansaamiseksi on Saaristomeren merenkulupiiri tutkinut Rauman sataman toimeksiannosta Rauman sataman tuloväylän syventämistä 11 tai 12 metrin kulkusyvyiseksi. (Rauman Satama, 2003). Rihtniemen väylä on esitelty tarkemmin riskianalyysin kirjallisuussosiossa (Sirkiä, 2003).



Kuva 9. Rauman Rihtniemen väylä. © Merenkululaitos, 2003.

Kyselytutkimuksen (Merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskus, 2003) vastausten perusteella Rauman satamassa väylien syvyyskäytännön muuttamista pidetään erittäin tarpeellisena sataman kannalta. Perusteluina mainittiin mm. vedenkorkeuden vaihtelut ja vajaalastien välttäminen. Raumalla nykyisestä käytännöstä on aiheutunut paljon ongelmia. Amerikan liikenteen alukset, joiden syväys on 10,8 m, tulevat ja lähtevät vajaalastissa. Nämä laivat tuovat kaoliinia Brasiliasta ja Savannahista. Brasilian laiva käy Kotkan kautta ja jättää osan lastista sinne ennen Raumalle saapumista, sillä Kotkan väylä on 15,3 metriä syvä. Matka kestää noin 14 vrk, joten vedenkorkeuden vaihtelujen varalle on lastattava joka tapauksessa hiukan vajaaksi. Samoilla aluksilla kuljetetaan Raumalta Baltimoreen paperirullia, joita mahtuisi alukseen nykyistä enemmän, sillä lasti ei ole tilavuus- vaan painokriittistä. (Rauma Stevedoring, 2003). Linjan alukset käyvät Raumalla viikoittain, joten ongelmat ovat jatkuvia. Myös isot viljalaivat lähtevät vajaina. Raumalla on haettu ja myönnetty paljon poikkeuslupia maksimisyvyyden ylittämiseen satamaan saavuttaessa miinusvedellä. Vedenkorkeuden vaihtelut tuottavat ongelmia myös satamasta lähdettäessä, osa lastista jää lastaamatta useita kertoja vuodesta. Rauman mareografi sijaitsee 8,4 kilometrin päässä väylän pahimmasta kohdasta, Kovankivien kapeikosta. Suomen rannikolla on 13 mareografia, joiden antaman tiedon oletetaan riittävän merenkulun tarpeisiin kaikkialla.

Kyselyn toisessa osassa haettiin syvyyskäytännön muuttamisen vaikutuksia satamien kannalta. Raumalla uudistuksesta koettiin saatavan paljon hyötyä ja liikenteen kehittyvän uudistuksen myötä 3 % vuodessa. Raumalaiset eivät odottaneet uudistuksesta aiheutuvan lainkaan liikenteen riskejä. Syvyyskäytännön muuttamisesta ei arvioitu aiheutuvan merkittävästi kustannuksia satamille. Kyselyssä selvitettiin myös satamien näkemyksiä väylien syventämistarpeista. Raumalla koettiin, että satamaan johtavilla väylillä on erittäin paljon syventämistarpeita. Lomakkeessa kysyttiin myös, pystyttäisiinkö syvyyskäytännön muuttamisesta saatavia hyötyjä vastaavat hyödyt saavuttamaan nykykäytännön joustavuutta lisäämällä. Vastauksissa oli hajontaa. Raumalla koettiin, että syventämistarvetta voitaisiin osittain kompensoida syvyyskäytännön muutoksella. Satamassa olevien alusten määrän lisääntymistä ei koettu merkittävänä Rauman satamassa. Satamaan liikennöivien alusten koon ja lastimäärän kasvu puolestaan koettiin merkittävänä. Amerikan linjan laivat kuljettavat nykyään noin 12 000 t, kun niihin mahtuisi lastia jopa 15 000 t (Rauma Stevedoring, 2003).

4.3.2 Laskentaesimerkki: Rauman Rihtniemen väylä – ruopattu alue R8

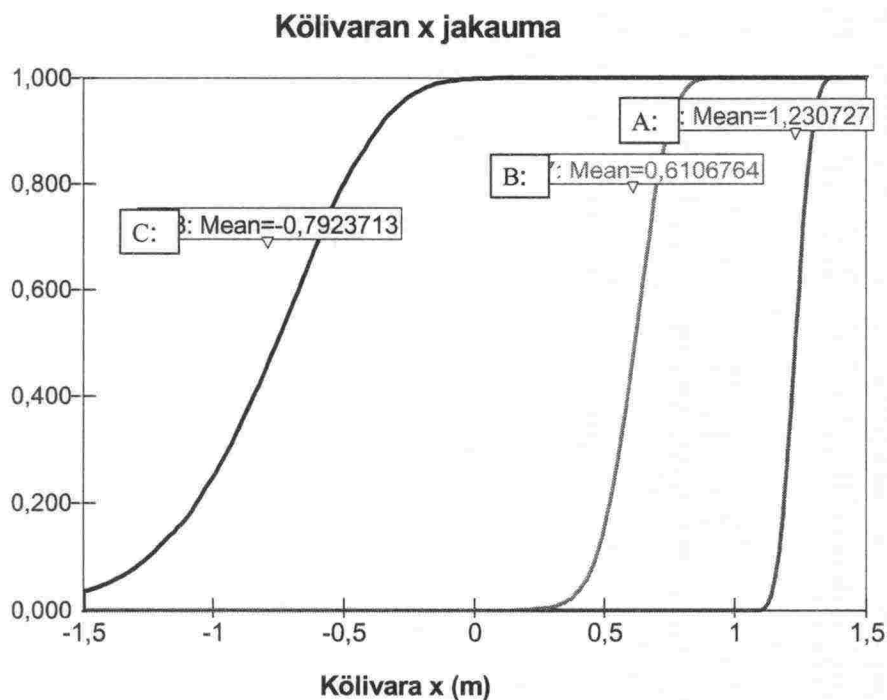
Väylä- ja aluskohtaisen riskianalyysin lähtökohdaksi valittiin Rauman Rihtniemen väylä sekä skaalattu tankkeri (Tervi skaalattu $T=10$ m, todellinen $T=12$ m), jota voidaan pitää edustavana yli 30 000 BWT aluksille (irtolastialukset, ro-ro't, tankkerit). Uuden väyläkäytännön sallimat joustot tulisivat juuri Rauman väylällä hyödynnettäviksi. Erityisesti valittiin ruopattu/louhittu alue R8 joka on heti Rauman väylän suulla. Alueen pituus on n. 1000m. Alueella R8 ei esiinny mutkia, joten ohjailukallistuma oletetaan mitättömäksi. Ohjailukallistumaa käsitellään erikseen seuraavassa laskentaesimerkissä.

Todetaan, ettei aallokko Rauman Rihtniemen väylällä Kovankivien kapeikon jälkeen juurikaan sisällä pitkiä aaltoja, jotka aiheuttaisivat ongelmia keinunnan suhteen, jolloin dynaamista liikettä arvioitaessa ei keinunnasta aiheudu haittaa. Sen sijaan ulompana väylällä aallokko voi sisältää myös pitkiä aaltokomponentteja, jotka ovat lähellä aluksen keinunnan resonanssikohtaa. Tällöin kuitenkin ei ole vaaraa pohjakosketuksesta suuremman vesisyvyyden vuoksi.

Laskentatilanne I – kolme olosuhdeskenaariota

Skenaario	A	B	C
<i>olosuhteet:</i>			
tuulensuunta	-11 ... +11	-11 ... +11	-11 ... +11
aallon korkeus, H_s	1,0 m	1,75 m	2,5 m
aallon periodi, T_p	5s	6s	7s
vesisyyvyys, W	12 m	12 m	12 m
<i>tuotetankkeri:</i>			
nopeus, v	10 kn (5,1 m/s)	10 kn (5,1 m/s)	10 kn (5,1 m/s)
syväys, D	10 m	10 m	10 m
kohtaamiskulma, α	45°	45°	45°
<i>laskennalliset suureet:</i>			
pystyliike (perä), σ_z/H_s	0,045	0,115	0,190
pystyliike, m_0	2,03E-3	0,013	0,226
aaltokohtaamiset, k	39 kpl	33 kpl	28 kpl
squat ($C_0 = 2,4; C_b = 0,8$)	0,76	0,76	0,76
<i>muut parametrit:</i>			
δ_w	0,1 m	0,1 m	0,1 m
δ_d	0,05 m	0,05 m	0,05 m

Voidaan todeta (ks. luku 4.1), että 45 asteen kulmassa kohdattavassa aallokossa aluksen vasteessa on huippukohta. Muissa kohtaamiskulmissa vastaava aallokko ei saa aikaiseksi yhtä suuria pystysuuntaisia liikkeitä.

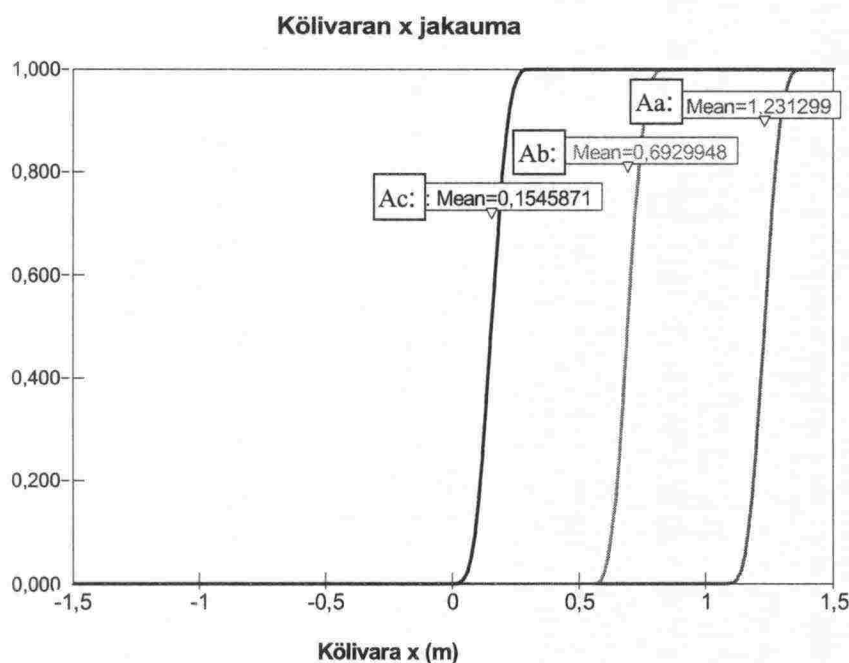


Kuva 10. Kölivaran x jakaumat olosuhdeskenaarioissa A, B ja C.

Huomataan, että skenaariossa C (periodi $T_p=7s$) alus on erittäin riskialtis. Ainostaan skenaariossa A on ajateltavissa syvyyden kasvattamista. Skenaariossa C oleellisin riskitekijä on aaltoiluun liittyvä satunnaisvaihtelu, skenaariossa A puolestaan vesisyvyyteen ja syvyyteen liittyvät epävarmuudet. Seuraavassa varioidaan skenaariota A kolmella syväysoptiolla: 10 m, 10,5 m, 11 m.

Laskentatilanne II – kolme syväysskenaariota

Skenaario	Aa	Ab	Ac
<i>olosuhteet:</i>			
tuulensuunta	-11 ... +11	-11 ... +11	-11 ... +11
aallon korkeus, H_s	1,0 m	1,0 m	1,0 m
aallon periodi, T_p	5s	5s	5s
vesisyvyys, W	12 m	12 m	12 m
<i>tuotetankkeri:</i>			
nopeus, v	10 kn (5,1 m/s)	10 kn (5,1 m/s)	10 kn (5,1 m/s)
syväys, D	10 m	10,5 m	11 m
kohtaamiskulma, α	45°	45°	45°
<i>laskennalliset suureet:</i>			
pystyliike (perä), σ_z/H_s	0,045	0,045	0,045
pystyliike, m_0	2,03E-3	2,03E-3	2,03E-3
aaltokohtaukset, k	39 kpl	39 kpl	39 kpl
squat ($C_0 = 2,4; C_b = 0,8$)	0,76	0,80	0,84
<i>muut parametrit:</i>			
δ_w	0,1 m	0,1 m	0,1 m
δ_d	0,05 m	0,05 m	0,05 m



Kuva 11. Kölivaran x jakauma kolmessa syväysskenaariossa.

Riskitaso skenaarioissa Aa, Ab ja Ac on nolla. Riskitekijöitä skenaarioissa Aa, Ab ja Ac ovat vesisyvyys ja syväys mutta eivät merkitseviä. Epävarmuudet ovat pieniä, mikä selittää jyrkän kertymäfunktion. Näiden skenaarioiden laskennassa aaltoilulla ei ole merkitystä.

4.3.3 Laskentaesimerkki: Rauman Rihtniemen väylä – ruopattu alue R6

Seuraava laskentaesimerkki kuvaa ohjailukallistuman merkitystä. Rauman Rihtniemen väylän käännöksen (ruopattu alue R6) suunnanmuutos on 42 astetta ja suunniteltu kaarresäde 800 metriä. Tällaisen käännöksen aiheuttaman kallistuskulman suuruus esimerkilaivalle voidaan arvioida olevan noin yhden asteen luokkaa. Yhden asteen kallistuman aiheuttama syväyden kasvu esimerkilaivalle on 0,22 metriä. Eri syistä johtuen käännös voidaan ajaa myös suunniteltua tiukemmin, mikä kasvattaa kallistuskulmaa. Tällainen tapaus on todennäköinen lähdeittäessä käännökseen liian myöhään.

Taulukossa (Taulukko 3) on laskettu 25 ja 30 m leveille laivoille syväyden kasvu muutamalla kallistuskulman arvolla. Laivan pääkaari on oletettu suorakulmaiseksi, eli pallepöyristystä ei ole huomioitu, jolloin lasketut luvut ovat konservatiivisia. Mikäli aluksella on pallekölit vastaavat lukuarvot hyvin todellista tilannetta. Taulukon 3 laadinta perustuu geometriseen tarkasteluun jossa syväyden kasvu u on kallistuskulman γ funktio:

$$u = 0.5B \sin \gamma$$

missä B on aluksen leveys.

Taulukko 3. Kallistuman aiheuttama syväyden kasvu 25 m ja 30 m leveille laivoille muutamalla kallistuskulman arvolla.

Kallistuskulma	Laivan leveys B=25 m	Laivan leveys B=30 m
[°]	Syväyden kasvu [m]	Syväyden kasvu [m]
1	0,22	0,26
2	0,44	0,52
4	0,87	1,05
6	1,31	1,57

Taulukon 3 luvut ovat deterministiseen analyysiin perustuvia lukuja. Väyläkohtaisessa riskimallissa liitetään em. laskentakaavaan epävarmuuksia kuvaavat todennäköisyysjakaumat. Mikäli kallistuskulmaan liittyy epävarmuutta voidaan syväyden kasvuun liittyvä epävarmuus esittää kallistuskulman todennäköisyysjakauman avulla seuraavasti:

$$p_u(u) = p(\gamma) \left| \frac{d\gamma}{du} \right| = p(\gamma) [0.5B \cos \gamma]^{-1}$$

Pohjakoetusriskin simuloinnissa saadaan syväyden kasvuun liittyviä otoksia generoitua suoraviivaisesti jakauman muunnoskaavaa hyödyntämällä.

4.3.4 Väyläkohtaisten riskitekijöiden merkitsevyysanalyysi

Riippuen riskitekijöiden epävarmuuksien suuruudesta voidaan arvioida niiden riskimerkitys erilaisissa olosuhdeskenaarioissa. Riskimerkitys voidaan mitata siten että verrataan kölivanan x jakauman 10% persentiilin alittavien lukuarvojen muodostamaa (eli otetaan x lukuarvoista pienimmät jotka vastaavat 10 % kaikista lukuarvoista) otospopulaatiota koko otospopulaation. Ne riskitekijät, joiden arvot ovat 'tuottaneet' kyseisen x :n otospopulaatioon ja joista laskettu mediaani poikkeaa koko riskitekijän otospopulaation mediaanista vähintään $0,5 \cdot$ riskitekijän hajonta, tulkitaan merkitseviksi. Merkitsevyysanalyysi poikkeaa perinteisestä herkkyys-analyysistä jossa deterministisen mallin parametrejä varioidaan joko poikkeuttamalla tietyllä prosentilla tai liittämällä siihen todennäköisyysjakauma.

Laskentatilanteen I riskitekijöiden merkitsevyys on esitetty alla (Taulukko 4). Laskentatilanteen II riskitekijöiden merkitsevyys on esitetty taulukossa (Taulukko 5).

Taulukko 4. Laskentatilanteen I riskitekijöiden merkitsevyys kölivanan suhteen.

Skeenario	A	B	C
Kölivanan persentiili	<10%	<10%	<10%
Syväys	+	0	0
Vesisyvyys	++	+	0
$z_{\max}(A)$	0	0	0
$z_{\max}(B)$	0	++	0
$z_{\max}(C)$	0	0	++

0 = ei merkitystä, + = kohtalainen merkitys, ++ = suuri merkitys

Taulukko 5. Laskentatilanteen II riskitekijöiden merkitsevyys kölivanan suhteen.

Skeenario	Aa	Ab	Ac
Kölivanan persentiili	<10%	<10%	<10%
syväys (A1)	+	0	0
syväys(A2)	0	+	0
syväys(A3)	0	0	+
Vesisyvyys	++	++	++
$z_{\max}(A)$	0	0	0

0 = ei merkitystä, + = kohtalainen merkitys, ++ = suuri merkitys

Laskentatilanteessa I, skenaarioissa B ja C, huomataan että aaltojen aiheuttama pystysuuntainen liike on merkittävin tekijä selittämään alhaisia kölivara-arvoja kuitenkin niin että skenaariossa B arvot ovat positiivisia koko otoksessa. Skenaariossa A ei aaltoilulla ole merkittävää osuutta kölivanan lukuarvoissa, sen sijaan vesisyvyys on merkittävä riskitekijä.

Laskentatilanteessa II, skenaarioissa Aa-Ac kölivara on koko otoksessa positiivinen. Vesisyvyydellä on selvä merkitys alhaisille köliarvoille jotka muodostavat 10% persentiilin alijoukon koko otosjoukosta. Jos syväyteen liittyvä epävarmuus kasvaa s.e. $\delta_d = 0,1$ saadaan merkitsevyydet seuraavan taulukon mukaisesti (Taulukko 6).

Taulukko 6. Laskentatilanteen II skenaarion Ac variointi.

Skeenario	Ac'	
	<10%	<0
Kölivaran persentiili	<10%	<0
syväys(A3)	++	++
Vesisyvyys	++	++
z_max(A)	0	0

0 = ei merkitystä, + = kohtalainen merkitys, ++ = suuri merkitys

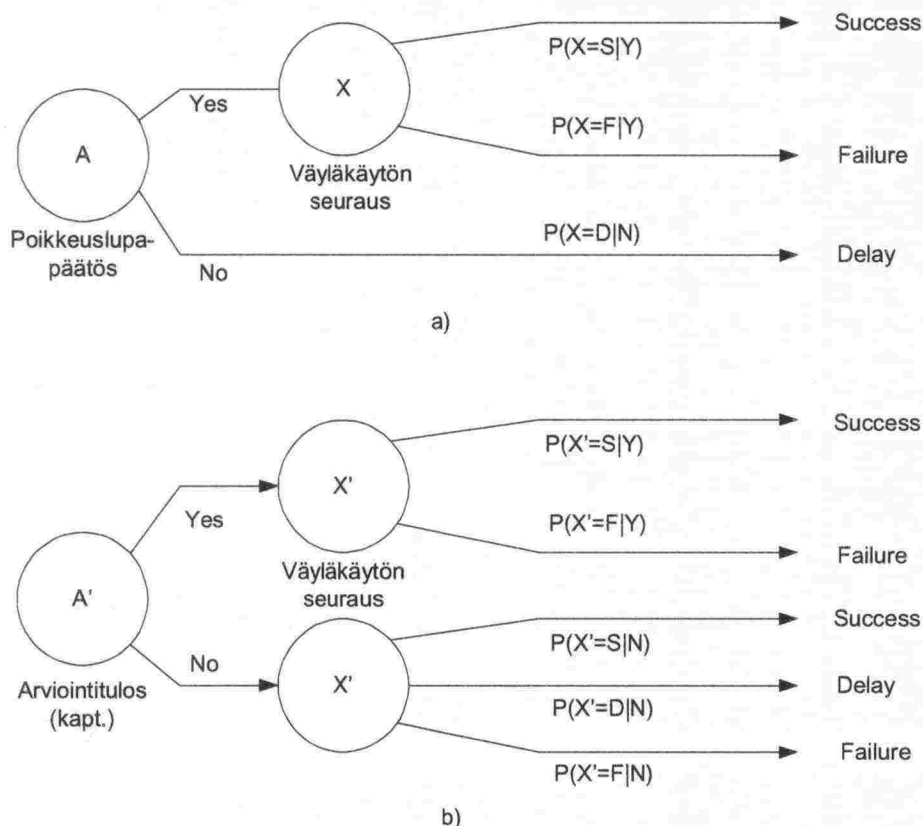
Nyt kölivara saa otoksessa myös negatiivisia lukuarvoja (<0) joiden suhteen vesisyvyys ja syväys ovat yhtä merkitseviä. On huomattava että epävarmuuteen voidaan vaikuttaa tekemällä tarkentavia mittauksia jommankumman tai molempien riskitekijöiden suhteen.

4.3.5 Väylästäön kokonaisriski

Väylä- ja aluskohtaisen riskianalyysin perusteella on todettava että riskimalli on verrattain yksityiskohtainen painottaen teknisiä riskitekijöitä. Riskimalli kattaa oleelliseksi havaitut riskitekijät jotka on mainittu luvussa 3 luokkiin L1 ja L2 kuuluviksi. Riskimallin pohjalta voidaan tehdä riskitietoisia päätöksiä väylän käytettävyydestä kulloisessakin väyläkäytön tapauksessa jossa epäillään riskiä. Kokonaisriskiä oletettavasti lisää se että rajatapauksia tulee enemmän kuin aikaisemmin ja riskin arvioi uudessa syvyyskäytännössä aluksen päällikkö jolla saattaa olla paineita suorittaa kuljetus sovitun kuljetussuunnitelman mukaan. Uuteen väyläkäytäntöön siirtymiseen ei periaatteessa sisälly teknisiä lisäriskejä (alusten ominaisuudet ja olosuhteita kuvaava informaatio ovat samanlaatuiset kuin aikaisemminkin). Siksi voidaan olettaa että mahdolliset lisäriskit liittyvät päätöksentekoprosessiin. Siksi väylä- ja aluskohtainen riskimalli on nähtävä riskitietoisien päätöksenteon analysointivälineenä, jonka avulla voidaan johtaa ohjausarvoja, erityisesti aluksen maksiminopeutta, pikemmin kuin väyläkäytäntöä kuvaavana riskimallina. Tämä voidaan matemaattisesti ilmaista seuraavasti: olkoon riskikriteerinä ehto $R(v, I) \leq R^c$ missä R^c on riskin hyväksyttävyytystaso. Nopeus v on asetettava s.e. että ehto toteutuu. Tämä riippuu alus- ja olosuhdekombinaatiosta I . Koska $R(v, I)$ on konservatiivinen, täyttää myös 'todellinen' riski (joka voidaan todeta vasta pitkällä aikavälillä havaitusta pohjakosketusdatasta) ehdon.

4.4 Päätöksentekoprosessin vaikutusanalyysi

Sekä vanhan että uuden syvyyskäytännön päätösprosessissa voidaan tunnistaa kaksi geneeristä vaihetta rajatapauksissa: informaation analyysivaihe sekä päätös väylälle menosta. Kuva 12 esittää päätösprosessin vaiheet vaikutuskaaviomuodossa sekä vanhan että uuden syvyyskäytännön tapauksissa.



Kuva 12. Vaikutuskaavio väylän käytön päätöksiin liittyen: a) nykykäytäntö, b) uusi syvyyskäytäntö

Nykykäytäntö:

Väylän poikkeusluvut 'rajatapauksissa' piiripäälliköltä. Jos OK, niin väylää kuljetaan, riskillä. Seuraukset voivat olla periaatteessa 'onnistuminen' tai 'pohjakosketus'. Jos kulkulupaa ei myönnetä, niin seurauksena 'viive' (kuva 9a).

Uusi syvyyskäytäntö:

Aluksen päällikön arvioitava itse väylän käytön riskejä sen informaation pohjalta mitä hankkii/annetaan. Jos arvio osoittaa että OK (esim. aluksen nopeusrajoitus mielekäs), voidaan väylää käyttää, mutta pienellä riskillä kuten nykykäytännössä. Jos arvio osoittaa ei-OK, voi aluksen päällikkö silti mennä omalla vastuullaan, seurauksena 'onnistuminen' tai 'pohjakosketus', muutoin seurauksena 'viive' (kuva 9b).

Päätösprosessien vertailussa pohjakosketusriskin suhteen lasketaan taajuudet 'pohjakosketukselle' molemmissa tapauksissa:

$$\begin{aligned} f_v(F) &= \alpha * f(A) * P(X = F | Y) && \text{(tapaus 'vanha')} \\ f_u(F) &= \alpha * f(A') * P(X' = F | Y) + (1 - \alpha) \beta f(A') P(X' = F | N) && \text{(tapaus 'uusi')} \end{aligned} \quad (5)$$

missä $\alpha, \alpha' < 1$ ovat myönteisten analyysitulosten osuus arvioitavissa tapauksissa; $f(A), f(A')$ ovat väylän käytön arvioiden määrä per aikayksikkö; ehdolliset todennäköisyydet $P(X|\cdot)$ on arvioitava tilastollisin perustein (mahdollista tapauksessa a) ja/tai asiantuntija-arvioin; β on 'uhkarohkeitten' päätösten osuus negatiivisten analyysitulosten joukossa. Tilastot/arviot kerätään alustyypeistä joita väyläkäytännön muutos käytännössä koskee ja ovat kuuluvat 'riskitapauksiin'.

Tietyillä oletuksilla voidaan johtaa kokonaisriskin muutos $f_u(F)/f_v(F)$. Oletetaan, että

- i) raja- tai riskitapausten määrä kasvaa kertoimella $\gamma \Rightarrow f(A') = \gamma * f(A)$
- ii) myönteisten analyysitulosten osuus ei muutu $\Rightarrow \alpha' = \alpha$
- iii) analyysitapa ja -laatu on samanveroinen kuin ennen $\Rightarrow P(X=F|Y) = P(X'=F|Y) << 1$
- iv) analyysin 'teoreettinen ennustustarkkuus' on $\frac{P(X = F | N)}{P(X = F | Y)}$

Tällöin

$$f_u(F)/f_v(F) = \gamma \left(1 + \beta \frac{1 - \alpha}{\alpha} \frac{P(X = F | N)}{P(X = F | Y)} \right) \quad (6)$$

Jos oletetaan että $\gamma = 1$, johtuu riskinkasvu pelkästään 'uhkarohkeitten' päätösten lisääntyneestä mahdollisuudesta. Jos taas oletetaan, että $\beta = 0$, eli 'uhkarohkeita' päätöksiä ei tehdä, kasvaa pohjakosketusriski samassa suhteessa kuin joustoa hyödyntävien kuljetusten suhteellinen kasvu nykyiseen poikkeuslupamäärään nähden.

Parametri $f_v(A)$ voidaan estimoida poikkeuslupatilastoista ja on noin 60 kpl / vuosi. Jäljellä olevien parametrien suhteen on huomattavasti vaikeampaa tehdä uskottavia oletuksia. Oletetaan, että $\beta = 0.1$, $\gamma = 1.1$ (rajatapausten määrä kasvaa 10% korkeammalle tasolle), $\alpha = 0.95$ (eli 5 arviointia sadasta johtaa negatiiviseen analyysitulokseen väyläkäytöstä), $\frac{P(X = F | N)}{P(X = F | Y)} \approx 1000$ (osoittajassa on todennäköisyys että tapahtuu pohjakosketus kun

analyysi antaa kieltävän tuloksen väylän käytölle, nimittäjässä on todennäköisyys että tapahtuu pohjakosketus kun analyysi tuottaa myöntävän vastauksen väylän käytölle). Oletetaan, että $P(X = F | N) = 0.9$ ja $P(X = F | Y) = 0.0009$. Estimoidaan $f_v(F) = 0.95 * 60 * 0.0009 \approx 0.05$ (ks. kaava 5). Tällöin saadaan estimaatiksi uuden väyläkäytännön pohjakosketustaajuudelle $f_u(F) = 0.34$ (kaavasta 6) eli pohjakosketusten lukumäärä on odotusarvoisesti runsaat kolme kymmenen vuoden aikana.

Tämän tyyppisellä ei-väyläkohtaisella päätöksentekoprosessin riskejä kuvaavalla mallilla on yhteys yleiseen hyötyanalyysiin kun seuraukset määritellään euromääräisesti, esim. vuosikohtainen keskimääräinen pohjakosketuskustannus: $\bar{c} = f(F) * C_F$, missä C_F on pohjakosketuksen keskimääräinen hinta. Tämä on vähennettävä siitä keskimääräisestä vuosittaisesta hyödystä jonka arvioissa 'pohjakosketuksia' ei ole huomioitu. Sama pätee kustannuksille jotka aiheutuvat 'viiveistä'.

4.5 Ympäristövaikutusanalyysi

Tässä luvussa tarkastellaan nykyisen käytännön ja uuden syvyyskäytännön eroja ympäristömielessä. Alusliikenteen ympäristövaikutuksiin sisältyvät sekä normaalin operoinnin vaikutukset että onnettomuustilanteissa mereen päässeiden haitallisten aineiden, useimmiten öljyn, vaikutukset. Kolmantena tasona voidaan nähdä tahalliset pilssivesi- ja öljypäästöt.

4.5.1 Normaalin operoinnin vaikutukset ympäristöön

Alusliikenteen ympäristövaikutukset voidaan jakaa suoriin ja epäsuoriin vaikutuksiin. Suorina vaikutuksina voidaan pitää aalto- ja virtausvaikutuksia sekä emissiopäästöjä. Epäsuoria ovat esimerkiksi liikenteestä aiheutuvien fysikaalisten muutostekijöiden vaikutukset ympäristön kasvillisuuteen ja kalastoon sekä niiden vuorovaikutussuhteisiin. Epäsuorana vaikutustekijänä voidaan nähdä myös alusten painolastiveden vaihto, mikäli siihen liittyy painolastivesien mukana kulkeutuvien uusien tulokaslajien leviämisen mahdollisuus. Seuraavassa on lyhyesti kuvattu alusliikenteen tärkeimpiä ympäristövaikutuksia ja lopuksi pohdittu uuden syvyyskäytännön mukanaan tuomia mahdollisia muutoksia näihin vaikutuksiin.

Eroosiovaikutukset

Mahdollisesti tunnetuin normaalin alusliikenteen aiheuttama ympäristövaikutusmuoto on nk. eroosiovaikutus, jota on erityisesti tutkittu Saaristomerellä ja Tukholman saaristossa. Viime vuosina on alusliikenteen vaikutuksia selvitetty lisää varsinkin Saaristomerellä, jossa pääpaino tarkasteluissa on ollut aalto- ja virtaushäiriöissä ja niiden osuuden selvittämisessä alueen silakan kutualueiden taantumiseen liittyen (VTT, 2000 ja 2002b). Nopeiden alusten aiheuttamia virtaus- ja aaltohaittoja on myös selvitetty sekä Helsingin että Tallinnan edustan merialueilla (PIANC, 2003). Väyliin liittyvää alusliikenteen aiheuttamaa häiriötä on myös käsitelty lähteissä (VTT, 1999 ja VTT, 2001a).

Eroosiovaikutukset normaalista alusliikenteestä kohdistuvat sekä merenpohjaan väylällä, että rannan ympäristöön. Väyläalueella ja satamissa aluksen lähellä eroosiota aiheuttavat aluksen propulsiolaitteistojen aiheuttamat virtaukset, nk. potkurivirtaukset ja takaisinvirtauksen nopeuskenttä aluksen ympärillä. Aaltojen aiheuttamaa rantoja kuluttavaa häiriötä on selvitetty esimerkiksi viitteessä (VTT, 2002a). Ohikulkevasta aluksesta aiheutuvat aallot ymmärretään usein samaksi aaltohäiriöksi, joka silmin todetaan rannalla, mutta viimeaikaiset selvitykset Saaristomerellä (VTT, 2002b), mallikoetulokset (VTT, 2000) ja nopeiden alusten aallonmuodostusta koskevat selvitykset (PIANC 2003) tukevat sitä käsitystä, että aallot aiheuttavat vaikutuksia myös rannan edustalla, syvemmällä kuin on aiemmin arveltu. Erityisesti nopeista aluksista aiheutuvat pitkät aallot ulottuvat hyvinkin vielä jopa 10...25 m syvyysalueella pohjaan. Pitkät aallot saattavat hetkellisesti nostaa hienoainesta pohjasta ylös mahdollistaen pohjasedimentin kulkeutumisen. Paikallisesti tuulelta suojatuilla alueilla on alusliikenteen aaltovaikutus merkittävä suhteessa tuuliaallon aiheuttamaan oskilloivaan virtausmuutokseen.

Aiemmin on alusten todettu aiheuttaneen enemmän eroosiohaittoja sora- ja hiekkarannoilla kuin nykyään. Osittain jopa vanhat eroosiorannat ovat saavuttaneet tasapainotilan, jossa eroosio on pysähtynyt ja uusi kasvillisuus on peittänyt vauriokohtia. Uuden sukupolven alukset ovat toisaalta suurempia kuin alukset 20-30 vuotta sitten, jolloin niiden aiheuttamat imuvaikutukset ovat kasvaneet: kasvaneiden imuvaikutusten johdosta pohjaan sedimentoitunut löyhä aines lähtee herkästi liikkeelle ja kulkeutuu virtausten mukana sellaisille alueille, jossa virtaustila on heikko, nk. akkumulaatiopohjille.

Biologiset vaikutukset

Normaalin alusliikenteen biologisina vaikutuksina voidaan todeta mm. kasvillisuuden lajittumista huuhteluvaikutuksesta aiheutuen: kalliorannoilla ko. tapahtumasta voi olla seurauksena kasvilajien ja eläinlajien määrän pienenemistä, sedimentin kulkeutumista, joka suurina pitoisuuksia voi haitata eri eliöryhmien kehitystä ja kalojen käyttäytymistä. Aaltojen ja virtausten aiheuttamasta eroosiosta aiheutuu myös epästabiilit olosuhteet, jolloin eroosiorantojen kasvisto köyhtyy, ja on epästabiilissa tilassa.

Lähellä laivaväylää olevilla rannoilla on alusliikenteestä todettu aiheutuvan sekä positiivisia, että negatiivisia vaikutuksia. Positiivisia vaikutuksia voi aiheutua alusten aiheuttamista aalloista niiden huuhtellessa rantoja. Vedenpinnan heilahtelulla rannalla voi myös olla ranta-eliöstön ekosysteemiä laajentava vaikutus.

Kalastomuutokset kulkevat "käsi-kädessä" kasvillisuusmuutosten kanssa. Kasvillisuuden muutokset heijastuvat pieneliöihin joiden rakenteessa tapahtuu myös muutoksia, josta seuraukset ulottuvat kalastoon ja merilintupopulaatioihin asti. Yhtenä voimakkaimmin merenpohjien kasvillisuus- ja kalastovyöhykkeitä muokkaava tekijä on ollut näkösyvyyden voimakas lasku rehevöitymisen seurauksena sekä runsaan sedimentaation aiheuttama pohjien liettyminen (VTT, 2001b).

Vaikutukset kaloihin ja kalastukseen

Laivaliikenteen vaikutuksista kalastoon tai kalastukseen on verrattain vähän objektiivista tutkimusaineistoa. Silakka ja sen kutualueet edustavat kalastosta ehkäpä tutkituinta aluetta. Tutkimuksia on suoritettu Turun edustalla useita.

Silakan kutualueet ovat kärsineet vesistöjen voimakkaasta rehevöitymisestä: pohjaan vajoava, osittain eloperäinen aines peittää kasvillisuutta, jolloin kutu ei kiinnity kasvien pintaan vaan joutuu heitteille. Airistolla on viime vuosina eräillä kutualueilla todettu mädin huuhtoutuneen lähes kokonaan tavallisesti perinteisesti hyväksi tunnetuilta kutualueilta. Yksi syy huuhtoutumiseen voi löytyä myös kasvillisuusmuutosten kautta: sedimentoitunut aines ja pienentynyt näkösyvyys muuttavat ympäristöolosuhteita, jolloin myös kasvien keskinäinen kilpailuasetelma ja tasapainotilanne muuttuu. Laivaliikenteellä on löyhiä pohjasedimenttejä sekoittava vaikutus erityisesti kapeilla ja matalilla saaristoväylillä. Ohittavien alusten vaikutuksesta löyhiä pohjasedimenttejä nousee vesipatsaaseen, kulkeutuen taas muualle. Kuitenkin välittömästi rantojen lähellä ohittavista aluksista aiheutuva huuhteleva vaikutus voi olla vaikutuksiltaan dominoivampi kuin sedimentaatiota aiheuttava vaikutus.

Alustyyppin ja käyttötarkoituksen merkitys ympäristövaikutuksen synnyssä

Alusten vaikutuksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon myös alustyyppit, jolloin todetaan liikenteen ympäristövaikutusmuodoista osan olevan sidoksissa aluksen käyttötarkoitukseen. Aluksen aallonmuodostus- ja virtausvaikutuksen lisäksi myös käyttäjien tarpeet ja käyttötavat luovat lähtökohdan vaikutusten esiintymiselle.

Matkustajaliikenne

Suurin mielenkiinto alusten ympäristövaikutuksista keskusteltaessa on yleensä kohdistunut Suomen ja Ruotsin väliseen matkustaja-autolauttaliikenteeseen, joskin alusliikenteestä puhuttaessa tulisi tarkastella kaikkia alustyypejä objektiivisesti. Ensimmäisen kerran kiinnitettiin laivaliikenteen aiheuttamiin eroosiovaurioihin huomiota Tukholman saaristossa

yli 20 vuotta sitten, jolloin laivaliikenteen epäiltiin olevan osasy s erityisesti hiekka- ja sorarantojen kulumiseen laivaväylien reuna-alueilla. Suomen puolella päähuomio kohdistui tällöin laivaväylien reuna-alueiden mahdollisiin kasvillisuus- ja kalastomuutoksiin, sillä kallioisemman luontonsa vuoksi ei eroosiohaittoja esiintynyt kuin paikoitellen pienessä mittakaavassa.

Verrattaessa vanhemman sukupolven aluksia uusiin, on todettavissa kaksi muutosta ympäristövaikutusmielessä: parantuneen runkosuunnittelun ansiosta ovat uudet alukset taloudellisempia, jolloin aallonmuodostusvastus osana kokonaisvastusta on pienempi. Esimerkiksi uudet autolautat aiheuttavatkin oleellisesti pienemmän aallon kuin 70-80 luvulla kulkeneet edeltäjänsä. Toisaalta imu- ja painevaikutukset ovat kasvaneet alusten koon kasvaessa, ja näiden vaikutukset voivat ulottua hyvinkin laajalle alueelle.

Nykytilanteessa Suomen ja Ruotsin välinen matkustaja-autolauttaliikenne jakaantuu sekä Helsingistä että Turusta Tukholmaan kulkevaan liikenteeseen. Alusten aiheuttama aaltohäiriö ja virtausvaikutukset ovat voimakkaampia Turun edustan merialueilla kuin Helsingin edustalla, jossa varsin pian satamasta lähdön jälkeen kuljetaan avoimessa ympäristössä. Toisaalta molempien linjojen alukset käyvät nykyisten tax-free -säädösten vuoksi Ahvenanmaalla, jossa autolauttojen aiheuttamat vaikutukset voivat olla Turkua suuremmat. Toisaalta Turun edustan merialueella kulkevat myös muut alukset, mm. Naantaliin menevä liikenne, jolloin kokonaisympäristövaikutukset Airistolla ja Saaristomerellä ovat suuremmat.

Perämeren ja Suomenlahden matkustajaliikenteelle on ominaista kulku lähes kohtisuoraan lahden poikki, jolloin matalassa ja saariston suojassa tapahtuvaa ajoa on varsin vähän. Varsinaista autolauttaliikennettä ei tällä hetkellä ole paljoa Perämerellä, mutta Suomenlahdella sitäkin enemmän: Helsingin ja Tallinnan matkustajamäärät ovat olleet vuositasolla jo luokkaa 6 miljoonaa matkustajaa, ja kesäkausina Helsingin ja Tallinnan välillä on yli 30 lähtöä päivässä. Näistä pääosa on nopeita yksi- tai monirunkoaluksia, joille on ominaista yli 30 solmun matkanopeus. Tulevaisuudessa on näköpiirissä, että meriliikenne ryhtyy ajamaan uusia reittejä, muihin Baltian maihin ja Venäjälle.

Rahtialukset

Säiliö- ja kuivarahtialusten ympäristövaikutukset ovat paljolti samansuuntaisia kuin autolauttojen kohdalla. Poikkeuksen muodostaa se seikka, että rahtialukset liikkuvat myös toisinaan ilman lastia, ballastissa, jolloin vaikutuskenttä on toisenlainen kuin täydessä lastissa kulkevan aluksen. On myös huomattava, että suurimpien rahtialusten syväys on 10 - 15 metriä Itämerellä, kun autolauttojen syväys jää noin 7 metriin.

Matalilla väylillä rahtiliikenteen vaikutukset korostuvat, vaikka alusten nopeus yleensä on verrattain pieni. Merenkulussa on Itämeren alueella viime vuosina siirrytty aikataulujen mukaiseen frekvenssiliikenteeseen, jolloin kustannus-tehokkuusmielessä on ryhdytty ajamaan aluksilla myös nopeammin. Liikenteeseen on hankittu yhä uudenaikaisempia aluksia, joiden nopeus on suurempi. Esimerkiksi uudet ropax-alukset kulkevat jo lähes 30 solmun nopeudella. Uusimmat ropax-alukset kulkevat tällä hetkellä Hankoon, mutta myös muihin satamiin kulkee hyvinkin suuria ja nykyaikaisia jumbo-ro-ro -aluksia.

Öljytankkereiden on todettu muodostavan huomattavan suuria aaltoja tyhjänä kulkiessaan, mikä viittaa siihen, että rungon muoto on suunniteltu lähinnä lastissa kulkevan aluksen käyttöominaisuuksia varten. Nestekuljetuksissa suurempien alusten käyttöä osalastissa rajoittaa vakavuuden heikkeneminen lastin liikkeen vuoksi.

Muut erityisalukset

Hinaajat aiheuttavat suuren syväytensä ja pyöreän runkomuotonsa vuoksi hyvin jyrkän aallon, erityisesti siirtoajossa. Varsinaisessa avustuksessa hinaajan aallonmuodostus on varsin merkityksellinen. Sen sijaan avustustoiminnassa hinaajan potkurivirtaukset saattavat vaikuttaa laajasti laivaväylän reuna-alueilla, sillä tilanteesta riippuen hinaajalla joudutaan operoimaan avustettavan aluksen ympärillä, usein myös laivaväylän reunamerkinneen ulkopuolellakin mikäli varavettä on riittävästi. Hinaajasta aiheutuvat potkurivirtaukset ovat aiemmin olleet perustana mm. satama-altaissa vaadittavien eroosiolaattojen mitoituksessa. On huomioitava, että uudet azimuth-tyyppiset potkurilaitteet kauppamerenkulun aluksissa ja jäänmurtajissa aiheuttavat hinaajien potkurivirtauksia oleellisesti suurempia virtauksia, jolloin näiden alusten käyttämien satamapaikkojen eroosiolaattojen mitoitus tulee tarkistaa suuremman konetehon ja potkuriakselin suuremman asennussyvyyden vuoksi. PIANC on asettanut työryhmän pohtimaan tätä ongelmaa, ja työryhmän raportti lienee käytettävissä vuoden 2004 lopussa.

Kulkusyvyysskäytännön muutoksen vaikutukset alusliikenteen ympäristövaikutuksiin.

Syvyysskäytännön muutos antaa hyvissä olosuhteissa mahdollisuuden alukselle liikkua väylällä suuremmassa syvyyksessä. Vertailtaessa aalto- ja virtausvaikutuksia kahdessa tapauksessa, missä alus kulkee nykykäytännön mukaan tietyllä syvyydellä ja uudessa käytännössä mahdollisesti hieman suuremmalla syvyydellä voidaan todeta, että:

Syvyysskäytännön muutos mahdollistaa entistä suuremman lastin kuljetuksen. Jos oletetaan kuljetuksen tapahtuvan samalla aluksella ja samalla nopeudella aiheutuu uudessa tilanteessa hieman suuremmat emissiopäästöt suuremmasta tehonkäytöstä johtuen. Toisaalta aluksella kyetään kuljettamaan suurempi lasti, jolloin kuljetettua tonnimäärää kohden päästöt todennäköisesti jopa laskevat. Väylä- ja satamapäästöjä ja niiden laskentatapoja on kuvattu mm. lähteessä (VTT, 2001c). Arvioitaessa uuden käytännön todellista vaikutusta täytyy myös todeta, että se todennäköisesti mahdollistaa varsin rajallisesti suurempien lastien kuljettamisen, jolloin vaikutusten arvioinnin tulee tapahtua satama- ja laivatyyppikohtaisesti.

Mikäli molemmissa tapauksissa etenemisnopeudet ovat samat, on aluksen nopeuspainuma hieman suurempi uudessa tilanteessa kuin aiemmin, sillä aluksen kulkemiseen käyttämä teho on suurempi uudessa tilanteessa ja vastaavasti aalto- ja virtausvaikutukset hieman suuremmat. Aallonmuodostuksen kannalta ei aluksen syvyyden ja vesisyvyyden suhteellinen muutos kuitenkaan ole suuri, ja vaikutukset näin ollen merkityksettä kauempana aluksesta.

Mikäli todellinen kölivara on pieni, esimerkiksi satamassa tai matalalla väylällä, joudutaan nopeuspainuman vuoksi ajamaan hitaammin. Tällöin aalto- ja virtausvaikutukset ovat edellistä skenaariota pienemmät. Ympäristömielessä hitaampi nopeus kompensoi suuremmasta aluksen syvyydestä aiheutuvia aalto- ja virtausvaikutuksia.

Aluksen potkurilaitteiden sijaitessa lähempänä pohjaa uudessa tilanteessa aiheutuu molemmissa tapauksissa samalla etenemisnopeudella ajettaessa uudessa tilanteessa suurempi potkurivirtaus väylällä: normaalissa navigoinnissa, so. aluksen ollessa kulussa normaalinopeudella ja potkurivirtauksen yhtyessä aluksen vanaveteen on mittauksin todettu, että potkurivirtauksen ollessa alle 4 - 6 kertaa aluksen nopeus tapahtuu jonkin verran potkurivirtauksen vaimenemista vanavedestä johtuen. Suurimmilla potkurivirtausnopeuksilla ei aluksen nopeudella ole vaikutusta potkurivirtaukseen, jolloin käytännön tarkkuudella voidaan crabbing-nopeudelle saatuja potkurivirtausyhtälöitä laajentaa koskemaan normaalia alusliikennettä.

Potkurivirtausnopeutta arvioitaessa yleensä tärkein tehtävä on arvioida virtausnopeutta pohjalla aluksen takana. Normaalille alusnopeudelle on esitetty kaava maksimi-potkurivirtausnopeuden arvioimiseksi pohjalla:

$$\max V_{B,J} = \max v_{B,J} \left(1 - \frac{V}{nD} \right) \quad (7)$$

missä $\max v_{B,J}$ on maksimi virtausnopeus pohjalla potkurin pyöriessä ja aluksen seisossa paikoillaan ja
 $\max V_{B,J}$ on maksimi virtausnopeus pohjalla normaalissa eteenpäin ajossa.

Potkuriakselin etäisyydellä pohjasta, h_p , on seuraava vaikutus maksiminopeuteen, V_B :

$$\frac{\max V_B}{V_o} = E \left(\frac{h_p}{D} \right)^{-1.0} \quad (8)$$

mikä yhdistettynä edellisen kaavan kanssa antaa:

$$\max V_{B,J} = E \left(\frac{h_p}{D} \right)^{-1.0} \cdot V_o \left(1 - \frac{v}{nD} \right) \quad (9)$$

missä E on vakio, ja riippuu aluksen perän järjestelyistä seuraavasti:
 $E = 0.71$, hoikka perä, peräsin keskellä,
 $E = 0.42$, hoikka perä, ei keskipärsintä ja
 $E = 0.25$, sisävesialus, tunneliperä, kaksi pärsintä.

Liikkeellä olevalle alukselle yhtälö voidaan muuttaa muotoon (Fuehrer, 1981),

$$\frac{\max V_x(h_p)}{V_o} = E \frac{D_o}{h_p} \left(1 - \frac{V}{nD} \right) \quad (10)$$

missä V on aluksen etenemisnopeus.

Yhdistelemällä saadaan suurimmaksi laivan potkureiden aiheuttamaksi virtaukseksi pohjalla,

$$\max V_x(h_p) = 0.95 E \left(\frac{D_o}{h_p} \right)^a (nD - V), \quad (11)$$

missä parametrit E ja a riippuvat alus- ja potkurityypistä sekä ympäristöolosuhteista. Täsmällisemmät kuvaukset esitettyjen kaavojen soveltuvuusalueista on esitetty mm. lähteissä (Blaauw, 1978 ; Römis, 1993). Aluksen trustereiden mitoitus on lisäksi käsitelty lähteessä (Schokking, 2002).

Mikäli oletetaan esimerkkitapauksessa aluksen potkuriakselin etäisyyden pohjasta olevan 3.5 m nykytilanteessa, ja uudessa tilanteessa 0.5 m lähempänä pohjaa, nähdään esimerkiksi kaavasta 8, että virtausnopeuden kasvu pohjalla on n. 16 % nykytilanteeseen verrattuna. Tämä pätee, jos molemmissa tilanteissa alusnopeudet ovat samat. Tiukempi varavesi kölin alla pienentää todennäköisesti etenemisnopeutta matalilla osuuksilla, jolloin todellinen vaikutuslisäys on nykytilanteeseen verrattuna merkityksetön.

4.5.2 Onnettomuuksien ympäristövaikutukset

Ympäristövaikutusten suuruuteen vaikuttaa mm. lastin laatu, aluksen/lastin koko, aluksen tyyppi, vuodenaika, pohjan laatu, sijainti merialueella, tuuli- ja virtausolosuhteet, jääolosuhteet ym. Pohjakosketuksen todennäköisyyden kasvaessa kasvaa myös ympäristövahingon todennäköisyys. Väylältä ulosajamisia voi lisätä pienempi varavesi kölin alla, sillä se vaikuttaa laivan ohjailtavuuteen. Nykyisen käytännön ja uuden syvyyskäytännön aikana tapahtuvien pohjakosketusten ja karilleajojen seuraukset eivät kuitenkaan juuri eroa toisistaan, sillä itse tapahtuman fysiikka ei muutu suuresti. Syvempään lastattu alus saa pohjakosketuksen hieman aikaisemmin ja se voi tapahtua eri kohdassa aluksen pohjaa. Karilleajoista alukselle aiheutuneita vaurioita analysoitaessa tärkeimmät tarvittavat tiedot karille ajaneesta aluksesta ovat aluksen uppouma ja nopeus karilleajohetkellä.

Pohjakosketustilanteissa pääsee harvoin öljyä mereen, sillä kaksoispohja suojaa tehokkaasti aluksen tankkeja vahingoittumiselta pienissä havereissa. Merenkulkulaitoksen tekemän 1990-luvun onnettomuusanalyysin (Merenkulkulaitos, 2001b) mukaan Suomessa tapahtuneissa pohjakosketuksissa ja karilleajoissa on sattunut hyvin vähän vakavia vaurioita. Vain prosentissa tapauksista alus on jäänyt hylkyksi. Yhdessä näistä tapauksista ei tiedetä öljyvahinkoja tapahtuneen (13 % tapauksista ei ole asian suhteen informaatiota). Suomessa tapahtui kyseisenä ajanjaksona 212 karilleajoa, eli keskimäärin 19,3 tapahtumaa vuodessa. Suurimmassa osassa (76 %) selvittiin pienin vaurioin. Rauman väylillä pahin kohta on Kovankivet, jossa väylän reunat ovat nimensä mukaisesti kalliota. Onnettomuusanalyysin mukaan Rauman edustalla on vuosina 1990-2000 sattunut 8 karilleajoa, joista 2 oli väylästä johtuvia.

Merionnettomuuksien yhteydessä öljypäästöt ovat toki mahdollisia. Pahimmat seuraukset on luonnollisesti raakaöljyä tai öljytuotteita kuljettavien tankkereiden lastitankkien vaurioituessa. Todennäköisyys kaksoisrunkoisen aluksen lastitankkien repeytymiseen rannikon väylillä on kuitenkin hyvin pieni. Toisaalta muidenkin kauppa-alusten onnettomuudet voivat olla ainakin paikallisesti tuhoisia, jos aluksen polttoainetankkiin syntyy repeämiä. Ympäristön kannalta pienetkin päästöt ovat haitallisia, jos niitä sattuu usein. Ympäristö ei ehdi palautua ja vahingon jäljet jäävät näin ympäristöön.

Iso-Britanniassa on laskettu onnettomuustilastojen perusteella arvioita todennäköisyyksille, että karilleajossa tapahtuu myös öljyvuoto (Safetec UK, 1999). Karilleajotapauksissa bunkkeriöljyvuodon todennäköisyys on tutkimuksen mukaan noin 0,12. Vuodot ovat laajuudeltaan pieniä (kategoria alle 1000 tonnia), sillä ainoastaan hyvin suurten alusten bunkkeritankin tilavuus riittää yli 1000 tonnin vuotoon. Keskimääräinen vuoto tässä kategoriassa oli kuitenkin vain 25 tonnia.

Öljyvuodosta aiheutuu haittaa kalakannalle, kalankasvatukselle, linnustolle, hylkeille, veneilylle ja virkistyskäytölle. Seuraavan yhtälön avulla voidaan arvioida rahamääräistä vahinkoa, mikä ympäristölle öljyvahingosta aiheutuu (VTI, 2002):

$$C_{env} [\text{Euro}] = 9,33 \times V_{oil} [\text{tonni}] + 610700, \text{ missä} \quad (12)$$

- C_{env} on ympäristövahingon kustannus ja
- V_{oil} on vuotaneen öljyn määrä.

Öljyntorjunnasta aiheutuva kustannus Euroopassa on keskimäärin noin 10 400 € per tonni (VTT, 2002c). Suomessa on öljyntorjuntatilastoihin nojautuen esitetty torjuntakustannuksille seuraava jaottelu ympäristöön joutunutta öljymäärää kohden (Jolma, 2003):

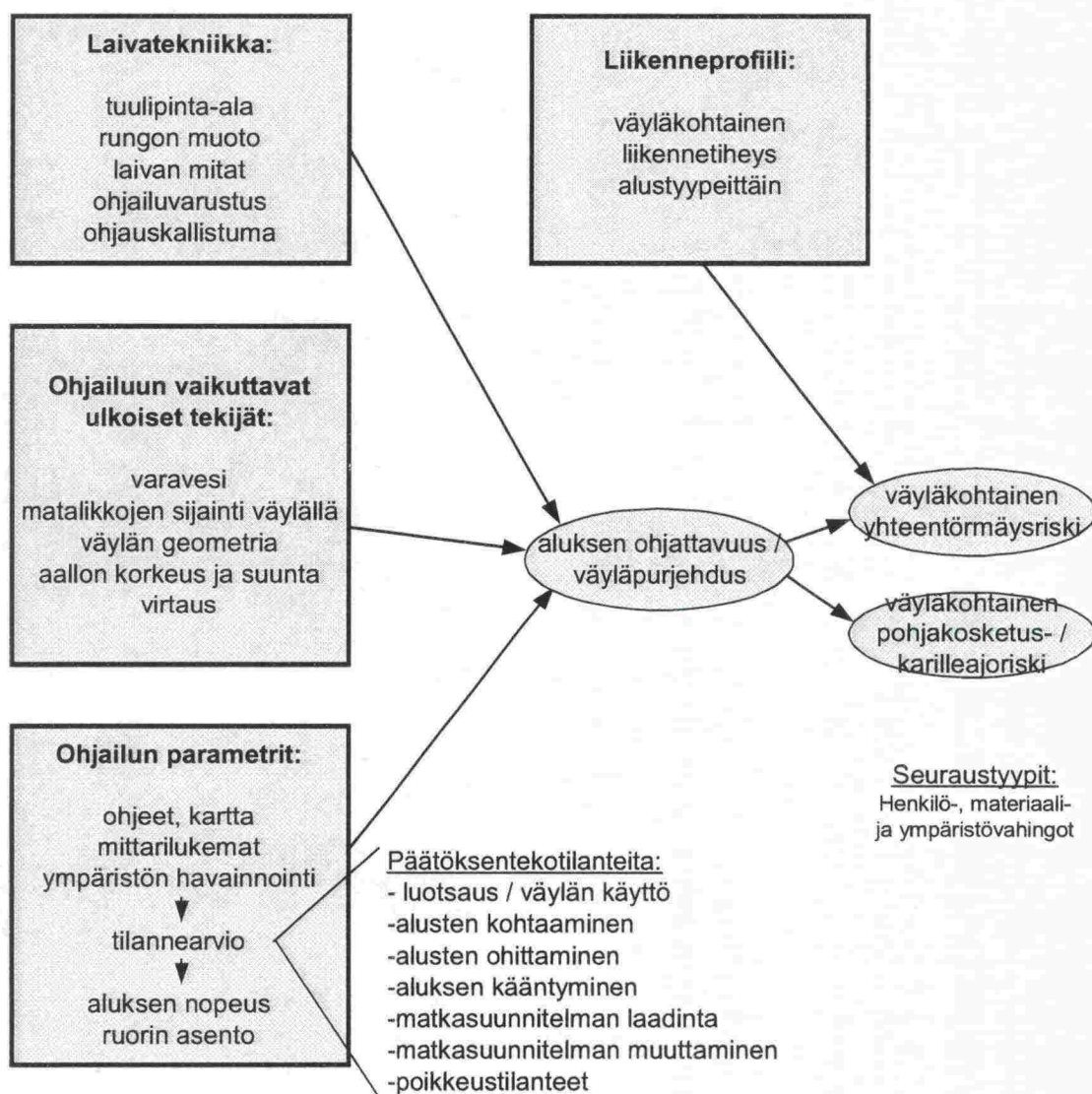
1. Torjuntatyö, jossa voidaan suoraan vaurioituneesta aluksesta pumpata öljy toiseen alukseen, vuoto rajoittuu välittömästi: 170 € / tonni.
2. Torjuntatyö, jossa öljy kerätään merestä mekaanisin välinein: 1 700 € / tonni.
3. Torjuntatyö, jossa öljy on rantautunut ja joudutaan keräämään rannoilta osin manuaalisesti sekä saneeraamaan rantaviivaa. Sisältää absorbenttien käyttöä ja puomitusta: 17 000 € / tonni.

Pohjakosketuksista aiheutuvia korjaus-, materiaali- ja seisontakustannuksia on arvioitu tarkemmin esimerkiksi lähteessä (VTT, 1994).

5 Tulokset

Väylän käyttöön liittyy lukuisia riskitekijöitä, joita voidaan luokitella eri tavoin. Kuvassa (Kuva 13) on pohjakosketus- ja yhteentörmäysriskin kannalta tunnistettu ja ryhmitelty riskitekijöitä. Kaavion tarkoitus on esittää kattavasti riskitekijät riskien kokonaiskuvan hahmottamiseksi ja tarkempien riskianalyyysien rajaamisen tueksi.

Uuden syvyyskäytännön riskitekijöitä



Kuva 13. Uuden syvyyskäytännön riskitekijöitä.

Tulokset asiantuntijaistunnosta

Asiantuntijaistunnon tuloksena voidaan esittää 7 syytä, jotka voivat johtaa pohjakosketukseen. Nämä eivät ole uuteen syvyyskäytäntöön siirtymisestä johtuvia uusia syitä, mutta niiden merkityksen epäillään korostuvan uuden käytännön myötä.

1. Aluksen lisääntynyt syväys (vähentynyt varavesi) heikentävät ohjailuominaisuuksia ja voivat johtaa karilleajo.
2. Miinusvedestä johtuva pohjakosketus väylällä.
3. Liian suuren nopeuden aiheuttama painuma (squat) johtaa pohjakosketukseen väylällä.
4. Lähtötiedoissa olevat epätarkkuudet ja virheet korostuvat.
5. Merenkulkijoilta puuttuu tietoa, jota tarvitaan turvalliseen navigointiin muuttuneessa tilanteessa.
6. Päätöksenteko siirtyy "konttoriin" eli rahtaaaja tekee aluksen syväystä koskevia päätöksiä.
7. Luotsin vastuu kasvaa liialliseksi ja päätöksenteko komentosillalla muuttuu ongelmalliseksi kun selvää viranomaisääntöä ei ole.

Neljää ensimmäistä syytekijää voidaan luonnehtia teknisiksi. Niitä voidaan osittain hallita paremmalla vedenkorkeuden sekä aluksen syvyyden mittaustiedolla, aluskohtaisella squat-käyrällä sekä kriittisten sääolosuhteiden paremmalla tuntemuksella, jolloin aluksen pystysuuntainen liike pystytään paremmin arvioimaan väylälle saavuttaessa. Tunnistetut tekniset syytekijät ovat laaditun väyläkohtaisen pohjakosketusriskin laskentariskimallin perustana.

Tulokset pohjakosketusriskin analyysistä

Pohjakosketusriskin analyysin tuloksena on kehitetty pohjakosketusriskin laskentamalli, jolla voidaan arvioida alus- ja olosuhdekohtaisia pohjakosketusriskejä Monte Carlo –simuloinnilla. Muuttujina mallissa ovat vesisyvyys, aluksen syväys, pystysuuntaisen liikkeen amplitudi sekä nopeuspainuma. Muuttujat (paitsi squat) ovat satunnaismuuttujia, joihin liitetään todennäköisyysjakamia kuvaamaan todellista vaihtelua tai tietoon liittyvää epävarmuutta. Riskin arviot ovat konservatiivisia (pessimistisiä). Riskimalli on kehitetty Rauman väylän riskianalyysiä varten ja erityisesti ruoppausalettia R8 koskevia riskitasoja on laskettu eri olosuhdeskenaarioissa. Riskitekijöitä kuvaavien muuttujien merkitsevyys vaihtelee skenaariosta riippuen. Väyläkohtainen riskimalli on kehitetty päätöksenteon tukivälineeksi. Kehitetty riskimalliversio on prototyyppi. Käsitteellisellä tasolla riskimalli on geneerinen ja räätälöitävissä muiden väylien riskitarkasteluihin.

Esimerkkilaskentojen perusteella voidaan todeta, että erityisen kriittisiä tilanteita pohjakosketusriskille ovat:

- Aluksen tulo väylän suulle avomereltä, jolloin pystysuuntaiset liikkeet saattavat olla vakaata väyläajoa oleellisesti suuremmat ja voivat aiheuttaa pohjakosketuksen. Väylän suu on monesti myös luotsinotopaikka, jolloin vauhtia hiljennetään. Todettakoon tässä, että pystysuuntaiset liikkeet voivat olla kriittisiä sivuaallokossa aluksen keskilinjan keulan ja perän pisteiden ohella myös palteitten kohdalla, jonka periodi on lähellä aluksen ominaisperiodia.

- Aluksen nopeuden ja siitä johtuvan nopeuspainuman suuri merkitys kölivaraan nähden.

Jälkimmäiseen havaintoon nojautuen voidaan esittää kysymys, kuinka nopeuspainuma käyttäytyy talvella. Tiettyyn alusnopeuteen yltämiseen käytetään jäissä ajettaessa oleellisesti suurempia konetehoja, jolloin vesivirtaus potkurin kohdalla on erittäin suuri, mikä vaikuttaa perän painumiseen. Perä painuu myös jos väylällä on jäätä, minkä päälle laivan keula nousee.

Päätöksentekoprosessin vaikutusanalyysi

Päätöksentekoprosessia kuvaava vaikutusmalli on kehitetty kaksivaiheisena: 1) väylän käytön analyysivaihe ja 2) päätösvaihe. Näiden vaiheiden tulokset johtavat erilaisiin väylän käytön seurauksiin eri todennäköisyyksillä. Tietyillä hyvin karkeilla oletuksilla voidaan arvioida pohjakosketustapahtuman taajuutta verrata vanhan ja uuden syvyyskäytännön välillä. Alustavissa laskelmissa riskin kasvu uuteen syvyyskäytäntöön siirryttäessä niiden alusten osalta, jotka saavat uudesta käytännöstä hyötyä, on vajaat 10 % vastaten tasoa 3.4 pohjakosketusta kymmenessä vuodessa. Riskin kasvu perustuu kahteen tekijään:

- Syvällä kulkevien rajatapauksen määrä kasvaa uuden joustomahdollisuuden myötä.
- Tilannearvio vääristyy kun aluksen päälliköllä on turvallisuuden ohella myös kuljetustaloudelliset tavoitteet varjeltavanaan.

Ympäristövaikutukset

Uuden syvyyskäytännön aiheuttamat muutokset ympäristövaikutusmielessä ovat vähäiset: vain osa aluskäynneistä kykenee käyttämään uuden käytännön tuomaa hyötyä. Suurempien lastien kuljettamisen mahdollisuus pienentää emissiopäästöjä kuljetettua tonnimäärää kohden. Aluksen suurempi syväys väylällä nostaa periaatteessa hiukan aalto- ja virtausvaikutuksia, väyläalueella potkurivirtausnopeudet pohjalla saattavat nousta 10-20 %. Pienemmästä varavedestä johtuen jouduttaneen kuitenkin ajamaan tavanomaista hiljempaa, jolloin pienempi alusnopeus kompensoi virtaus- ja aaltovaikutukset.

Pohjakosketusten ollessa kyseessä, tapahtuman seuraus on yleensä vain pelkkä raapaisu, eikä öljyä pääse mereen. Näin ollen ympäristöön kohdistuvien seurausten ei odoteta juurikaan muuttuvan, vaikka pohjakosketusriski kasvaisi.

6 Johtopäätökset

Riskimallia voidaan periaatteessa soveltaa väyläkohtaisesti rajatapausten tunnistamiseen eli niiden alus- ja olosuhdekombinaatioiden tunnistamiseen, joihin liittyy riskiä väyläajossa. Näin ollen voidaan kuljetusten suunnittelussa ennakoida ne alus-, lasti- ja olosuhde-kombinaatiot, jotka suurella todennäköisyydellä eivät tule täyttämään asetettua riskikriteeriä. Edellytys tällaiselle riskitietoiselle kuljetussuunnittelulle on, että osa riskitekijöistä olisi eliminoitavissa tai hallittavissa paremmalla mittaustiedolla ja ennusteella. Tämä koskee erityisesti vedenkorkeustietoa väylällä, mutta myös aluksen syväystietoa.

Uuden syvyyskäytännön salliman jouston hyödyn ulosmittaaminen edellyttää kuljetussuunnitelmaa laadittaessa hyvää tuntemusta erityisesti nopeuspainuman vaikutuksesta pohjakosketusriskiin. Mahdollinen ristiriitainen tilanne on aluksen ohjattavuuden kannalta riittävä nopeus ja pohjakosketusriskin kannalta suurin sallittu nopeus. Ongelman ratkaisu edellyttäisi, että aluksista olisi olemassa aluskohtaiset squat-käyrät, jotka olisivat sekä luotsin että aluksen päällikön käytettävissä.

On huomattava, että luotsien ammattitaito on sidottu niihin tiettyihin väyliin, joihin heillä on ohjauskirja. Sellaisille väylän pohjakosketusriskin analyysityökaluille voisi olla tarvetta, joita luotsi voi hyödyntää harkitessaan mahdollisuuksiaan ajaa väylää tai alusta, josta ei ole pitkäaikaista kokemusta. Tämä edellyttää halua soveltaa uutta riskipohjaista laskentatyökalua.

Aluksen päällikön ja luotsin roolijako päätöksentekotilanteessa on oltava selkeä: Jos luotsilla on konsultoiva rooli, niin mitä informaatiota aluksen päällikön ja luotsin välillä on annettava jotta aluksen päällikkö voi tehdä väyläajoa koskevan arvionsa ja päätöksensä. Entä kuinka velvoittavana kokee luotsi päätöksen, mikäli hänen oma arvionsa väylän käytöstä on, aluksen päällikön päätöksen vastaisesti, negatiivinen? Päätöksentekoprosessin tulisi olla sellainen että 'uhkarohkeat' päätökset ja niiden tekijä pystytään tunnistamaan.

Uutta syvyyskäytäntöä sovelletaan kauppamerenkulun väyliin. Nykykäytäntöä tullaan jatkossakin soveltamaan muihin väyliin, mikä saattaa synnyttää sekaannusta väylän käytön periaatteista ja niiden soveltamisesta todellisessa tilanteessa.

Pohjakosketukseen voidaan liittää keskimääräinen kustannus vahinkotilastojen pohjalta. Kustannuksia voi aiheutua mm. hinauksesta, telakoinnista, korjauksesta, materiaali- ja ympäristövahingoista sekä seisonnasta. Vuosikohtainen kustannus voidaan arvioida raportissa esitetyn kaksivaiheista päätöksentekoprosessia kuvaavan riskimallin pohjalta. Taloudellinen kannattavuus vuositasolla, uuteen väyläkäytäntöön siirryttäessä, saadaan vähentämällä pohjakosketuksiin liittyvä keskimääräinen vuosikustannus vuosittaisesta hyödystä kun oletetaan, että pohjakosketuksesta huolimatta kuljetus saadaan vietyä perille.

Väyläkohtaisten riskitarkastelujen tarve määräytyy oleellisesti kriittisten lasti- ja alus-kombinaatioiden kasvuodotusten perusteella. Uudesta käytännöstä ei välttämättä suoraan seuraa varaveden pientymistä. Osa liikenteestä käyttää suunnittelukulkusyvyvyyttä ja huomioi vedenkorkeuden vaihtelut entiseen tapaan. Toiset alukset kuljettavat tilavuuskriittistä lastia, eivätkä saa lastattua nykyistä syvempään. Mikäli aluskoot kasvavat pitkällä tähtäimellä, tarve väyläkohtaisille riskitarkasteluille todennäköisesti kasvaa. Alusten leveyden kasvaessa myös väylän horisontaalinen käyttö tulee uutena riskitekijänä tarkastella riskianalyysissä.

Pohdintaa syvyyskäytännön muuttamisesta

Tämän työn lähtökohtana ja Merenkululaitoksen määrittelemänä tavoitteena syvyyskäytännön muuttamiselle oli siirtyä käytäntöön, jossa kulkusyvytyden sijasta ilmoitetaan väylän varmistettu vesisyvyys. Tämän selvityksen riskianalyysi perustuu tähän näkökulmaan. Työn aikana on yhteisissä keskusteluissa noussut esille tekijöitä, että syvyyskäytäntöä saatetaan muuttaa nk. suositusmallin pohjalta. Tätä käsitystä tukee tämän työn osana Merenkululaitoksessa tehdyn diplomityön tulokset (Sirkiä, 2003). Suositusmallissa kulkusyvyysmerkinnät säilyisivät kartoilla ns. suunnittelukulkusyvytyksinä, ja niitä voitaisiin tulkita joustavammin kuin nykykäytännössä. Haraussyvyystieto merkittäisiin väyläkorttiin.

On oletettavaa, että suosituskäytännössä karttamerkintöihin liittyvät epäselvyydet ovat vähäisemmät kuin varmistetun vesisyvytyden käytännössä, missä informaatiota on kartalle koodattu runsaammin. Toisaalta vesisyvytyskäytännön puolesta puhuu se, että harausmerkinnät mahdollistavat tarkemman kuljetussuunnitelman laadinnan ja mahdollisuuden jouston täysimääräiseen hyödyntämiseen. Suosituskäytännössä jää myös toteutumatta siirtyminen kansainväliseen käytäntöön. Tämä vesittää periaatteessa alkuperäisen tavoitteen noudattaa yleisesti hyväksyttyä kansainvälistä käytäntöä. Pahimmat miinusvedestä johtuvat loukut poistunevat Suomen satamien väyliltä kumpaan tahansa vaihtoehtoista siirrytäänkään. Vastuukysymyksiäkin selkeytettäneen vanhasta käytännöstä luovuttaessa joka tapauksessa.

Nykykäytäntöön verrattaessa riski kasvaa hieman kun käytännön muuttamisella pyritään hyödyntämään varavesimarginaalia, ja alukset lastataan nykyistä syvempään. Riskin kannalta uusien käytäntöjen väliset erot liittyvät lähinnä päätöksentekoprosessiin syvyystietojen käytön osalta. Tämä saattaa näkyä myös kuljetussuunnitelman laadinnassa. Mikäli varmistetun vesisyvytyden tietojen saatavuus ja käyttötapa on yhtäläinen suositus- ja vesisyvytyskäytännön välillä, ei riskin kannalta ole odotettavissa eroja näiden käytäntöjen välillä. Luotsien käytännöillä ja ohjeistuksella on kuitenkin ratkaiseva merkitys uudesta kulkusyvytyskäytännöstä saatavan hyödyn, kuten siitä aiheutuvan riskinkin, suuruuteen. Syvyyskäytäntöjen eroavaisuuksien arviointi pohjakosketusriskin suhteen näyttäisi edellyttävän seikkaperäisempää päätösprosessin mallintamista kuin mitä tässä selvityksessä on esitetty, selvityksen painottuessa varmistetun vesisyvytyden ja nykykäytännön eroihin.

Lähdeviitteet

Blaauw, H. & Van de Kaa, E. 1978. Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships. 7th International Harbour Congress. Paper 2.08.

Fuehrer, M. et al. 1981. Criteria for dimensioning the bottom and slope protections and for applying the new methods of protecting navigation canals. PIANC 25th Congress, Edinburgh.

Garrison C. J. 1980. Wave loads on large displacement structures with superstructures based on diffraction theory. C.J. Garrison & Associates, Report No. 76-105.

ITTC 2002. The Specialist Committee on Waves. 23rd International Towing Tank Conference (ITTC).

Jolma, 2003. Puhelinkeskustelu Suomen ympäristökeskuksen yli-insinöörin Kalervo Jolman kanssa 9.10.2003.

Merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskus, 2003. Väylien syvyyskäytännön muuttaminen. Satamille tehdyn kyselytutkimuksen tulokset. 6.8.2003.

Merenkulkulaitos, 2000. Merenkulkulaitoksen ohjeet luotsauksesta. Dnro 1/510/2000. Annettu 14.6.2000.

Merenkulkulaitos, 2001a. Laivaväylien suunnitteluohjeet. Merenkulkulaitoksen sisäisiä julkaisuja 1/2001. Helsinki 2001.

Merenkulkulaitos, 2001b. Onnettomuusanalyysi 1990-2000: Karilleajot ja yhteentörmäykset. ISBN 951-49-0949-6. Merenkulkulaitoksen julkaisuja 7/2001. Helsinki 2001.

Merenkulkulaitos, 2002. Merenkulkulaitoksen ajankohtaislehti Meriväylä 4/2002.

Merenkulkulaitos, 2003. Puhelinkeskustelut merenkulkupiirien piiripäälliköiden kanssa 6.10.2003.

Merentutkimuslaitos, 2003. Merentutkimuslaitoksen www-sivut [online, viitattu 9.10.2003]. Saatavissa: <http://www2.fimr.fi/fi.html>

Oltmann, Peter. Roll – an often neglected element of manoeuvring. MARSIM'93. International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability. St. John's, Newfoundland, Canada Sept. 26 – Oct. 2, 1993.

PIANC, 2003. Guidelines form Managing Wake Wash from High-Speed Vessels. Report of WG 41. Maritime Committee of the International Navigation Association (PIANC). 2003.

Rauma Stevedoring, 2003. Puhelinkeskustelu osastopäällikkö Timo Laineen kanssa, Oy Rauma Stevedoring Ltd / Varustamopalvelut. 9.10.2003.

Rauman Satama, 2003. Rauman Sataman www-sivut [online, viitattu 10.10.2003]. Saatavissa: <http://www.portofrauma.com>

Römisch, K. 1993. Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen in Häfen. Häfen & Wasserstrassen. Hansa, Nr. 8/1993. S. 62 - 68.

Safetec UK, 1999. Identification of Marine Environmental High Risk Areas (MEHRAs) in the UK. Doc. No.: ST-8639-MI-1-Rev 01. December 1999.

Schokking, L. 2002. Bowthruster-Induced Damage. Technical Report. Ministerie van Verkeer en Waterstaat & TU Delft. 143 s.

Sirkiä E, 2003. Meriväylien uusi kulkusyvyysskäytäntö: Vertikaalisen väylätilan suunnitteluperiaatteet ja riskit. Diplomityön käsikirjoitus. Teknillisen korkeakoulun Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto.

VTT, 1987. Sukselainen, J ja Matusiak, J. JM Urhon ja JM Kontion perän painuman mittaukset. VTT Valmistustekniikka, LAI-7414/87. Espoo 1987.

VTT, 1994. Rytkönen, J ja Sukselainen, J. Kustannus/hyöty-analyysi Saaristomerelle suunnitellulle meriliikenteen hallinta- ja informaatiojärjestelmälle. VTT Valmistustekniikka, VALC29. Espoo 1994. 80 s.

VTT, 1999. Alusten aiheuttamat virtaukset Hepokarin väylän suunnitellulla läjitysalueella - alustava arvio. Tutkimusselostus VAL34-992432. VTT Valmistustekniikka. 23.6.1999.

VTT, 2000. Ship-generated waves in Archipelago Waterways. Research Report (Confidential) VAL32-001050. VTT Manufacturing Technology. 4. April 2000.

VTT, 2001a. Laivojen aiheuttama aalto- ja virtaushäiriö rannassa. Aalto- ja virtausmittaukset Airistolla 02-05.05.2000. Tutkimusraportti BVAL34-001016. VTT Valmistustekniikka. Espoo 27.02.2001. 40 s + liitt. 20.

VTT, 2001b. Merenpohjan liettymisen vähentäminen ruoppaus- ja läjitystoiminnassa ja silakan kutualueiden saneerauksen mahdollisuudet Turun Airistolla. Tutkimusraportti BVAL34-011094. VTT Valmistustekniikka. Espoo 26.02.2001. 63 s.

VTT, 2001c. Suomen vesiliikenteen päätöjen laskentajärjestelmä MEERI 2001. Tutkimusraportti RTE 3166/02 VTT rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 42 s.+ liitt. 13. Espoo, 2002.

VTT, 2002a. Alusliikenteen aiheuttama aalto- ja virtaushäiriö. Tutkimusraportti VAL34-013037. VTT Valmistustekniikka. 77 s + liitt. 7. Espoo, 28.01.2002.

VTT, 2002b. Alusliikenteen ja tuulen aallonmuodostus ja eroosiovaikutukset eteläisellä Airistolla. Tutkimusraportti (luottamuksellinen). VTT Tuotteet ja tuotanto. 60 s + liitt. 5. Espoo, 08.02.2002.

VTT, 2002c. The implementation of the VTMS-system for the Gulf of Finland. Formal Safety Assessment -study. VTT Industrial Systems. Research Report (Confidential) VAL34-013153. Espoo, 2002.

Ympäristöhallinto, 2003. Yleisiä ohjeita ja säännöksiä vesistöön rakennettaessa / 3.4.2001. [online, viitattu 9.10.2003]. Saatavissa: <http://www.vyh.fi/hoito/vesirak/vesiohje.htm>

Liitteet

Liite 1. Aaltotilastot

Liite 2. Pystyliikkeet säännöllisessä aallokossa

Liite 3. Pystyliikkeet epäsäännöllisessä aallokossa

Liite 4. Keinunnan aiheuttama pystyliike palteitten kohdalla

Aaltotilastot

Merenkäyntitilastot Sandbäckin alueelta. Kaikki tuulensuunnat.

Finnish Institute of Marine Research

Wave data from Sandbäck 60 56.4 N 20 45.0 E
Missing values predicted by seasonal distributions
1982 - 1986
All directions

significant wave height [m]	peak wave period [s]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	tot
0.00 : 0.25	0	138	171	96	6	0	0	0	0	0	411
0.25 : 0.50	0	434	482	318	53	6	0	0	0	0	1293
0.50 : 0.75	0	33	367	475	145	32	0	0	0	0	1052
0.75 : 1.00	0	6	112	422	248	41	31	0	0	0	860
1.00 : 1.25	0	0	7	242	325	111	9	2	0	0	696
1.25 : 1.50	0	0	0	66	272	121	6	2	0	0	466
1.50 : 1.75	0	0	2	10	169	198	29	2	0	0	409
1.75 : 2.00	0	0	0	0	82	186	33	2	0	0	303
2.00 : 2.25	0	0	0	0	10	69	59	0	0	0	139
2.25 : 2.50	0	0	0	0	8	61	92	16	0	0	177
2.50 : 2.75	0	0	0	0	0	22	59	32	0	0	113
2.75 : 3.00	0	0	0	0	0	11	45	28	0	0	84
3.00 : 3.25	0	0	0	0	0	2	36	37	0	0	74
3.25 : 3.50	0	0	0	0	0	0	2	43	3	0	48
3.50 : 3.75	0	0	0	0	0	0	0	26	9	0	35
3.75 : 4.00	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	23
4.00 : 4.25	0	0	0	0	0	0	0	8	9	4	21
4.25 : 4.50	0	0	0	0	0	0	0	2	9	0	11
4.50 : 4.75	0	0	0	0	0	0	0	4	6	2	11
4.75 : 5.00	0	0	0	0	0	0	0	4	3	0	7
5.00 : 5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	3	2	5
5.25 : 5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
5.50 : 5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
5.75 : 6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	611	1141	1629	1317	861	400	228	43	10	6240

In this table the middle of the range of the peak wave period T_p is shown: 2s means $T_p < 2.5s$, 3s means $2.5s < T_p < 3.5s$ ect.

LIITE 1

Merenkäyntitilastot Sandbäckin alueelta. Pohjoistuuli.

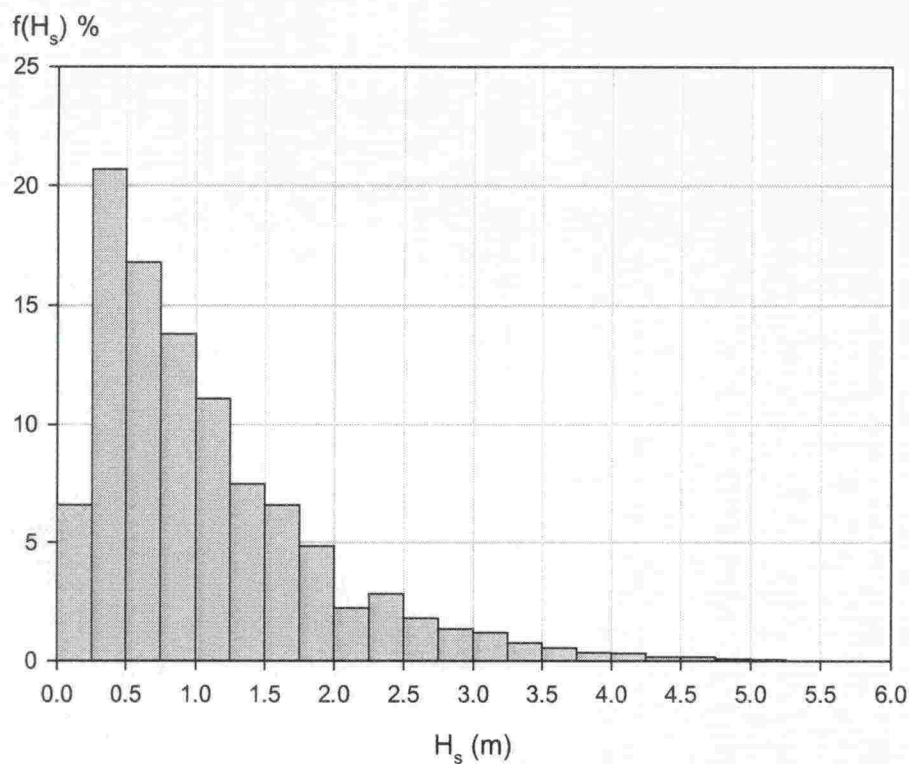
Finnish Institute of Marine Research

Wave data from Sandbäck 60 56.4 N 20 45.0 E
Missing values predicted by seasonal distributions
1982 - 1986
Wind direction -11 to 11

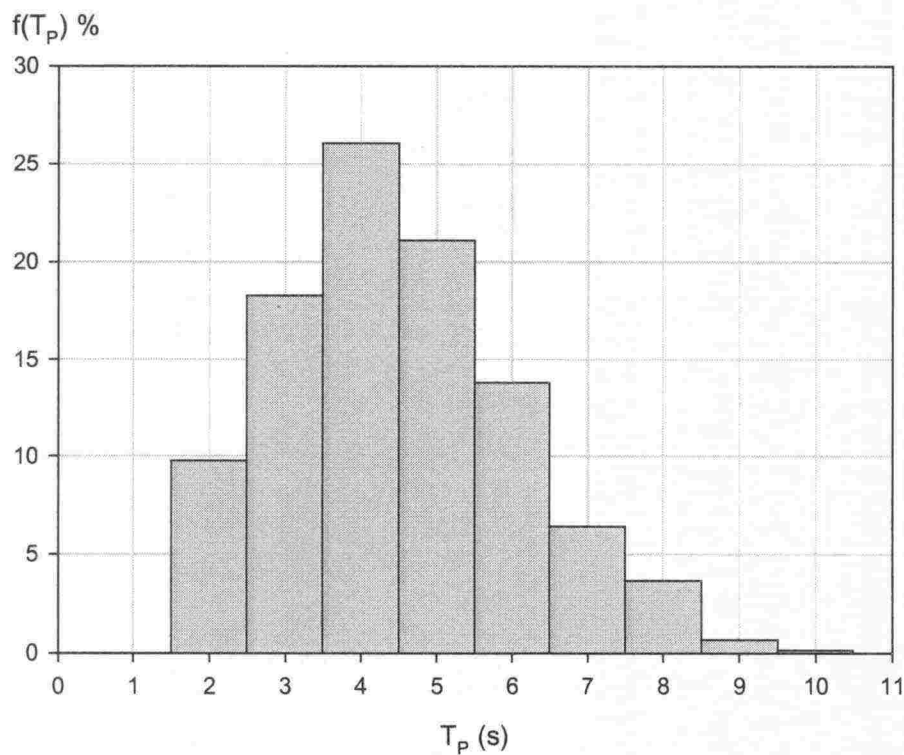
significant wave height [m]	peak wave period [s]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	tot
0.00 : 0.25	0	6	6	0	0	0	0	0	0	0	13
0.25 : 0.50	0	8	20	23	0	0	0	0	0	0	51
0.50 : 0.75	0	0	3	38	31	8	0	0	0	0	80
0.75 : 1.00	0	0	2	9	20	6	6	0	0	0	43
1.00 : 1.25	0	0	0	8	5	6	3	0	0	0	22
1.25 : 1.50	0	0	0	2	2	3	0	0	0	0	6
1.50 : 1.75	0	0	0	0	4	3	5	0	0	0	12
1.75 : 2.00	0	0	0	0	2	16	2	0	0	0	19
2.00 : 2.25	0	0	0	0	0	10	12	0	0	0	22
2.25 : 2.50	0	0	0	0	0	7	21	5	0	0	33
2.50 : 2.75	0	0	0	0	0	0	14	5	0	0	19
2.75 : 3.00	0	0	0	0	0	0	14	8	0	0	22
3.00 : 3.25	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	5
3.25 : 3.50	0	0	0	0	0	0	0	11	0	0	11
3.50 : 3.75	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	5
3.75 : 4.00	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2
4.00 : 4.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.25 : 4.50	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
4.50 : 4.75	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	3
4.75 : 5.00	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
5.00 : 5.25	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
5.25 : 5.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.50 : 5.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
5.75 : 6.00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
total	0	14	32	79	63	60	79	37	8	3	375

In this table the middle of the range of the peak wave period T_p is shown: 2s means $T_p < 2.5s$, 3s means $2.5s < T_p < 3.5s$ ect.

LIITE 1

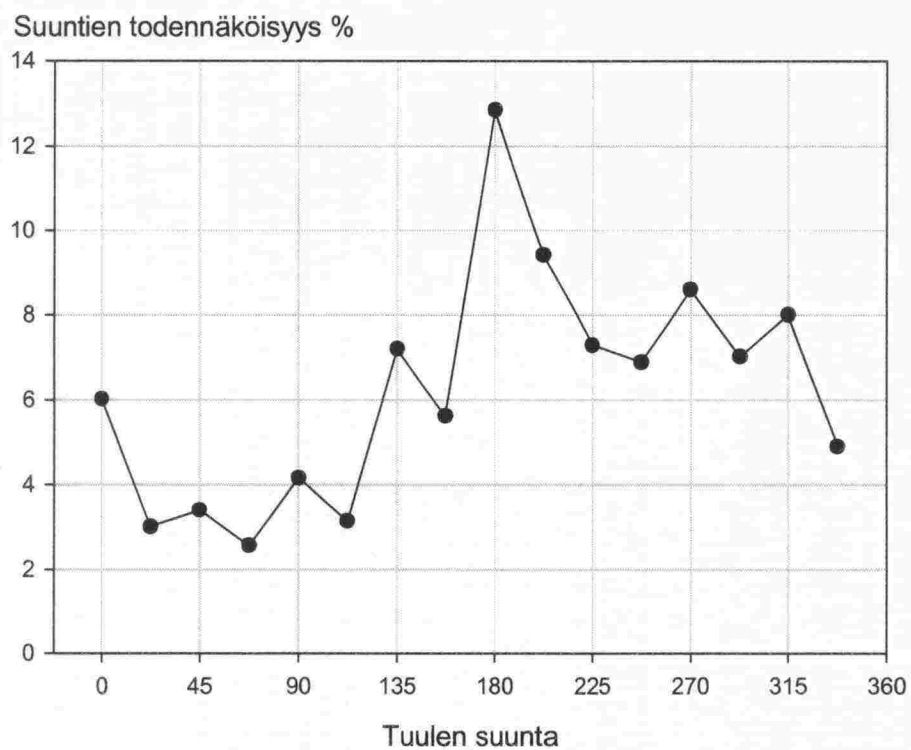


Aallonkorkeuksien H_s todennäköisyysjakautuma Sandbäckin alueella, kaikki tuulensuunnat.



Aallon periodeiden T_P todennäköisyysjakautuma Sandbäckin alueella, kaikki tuulensuunnat.

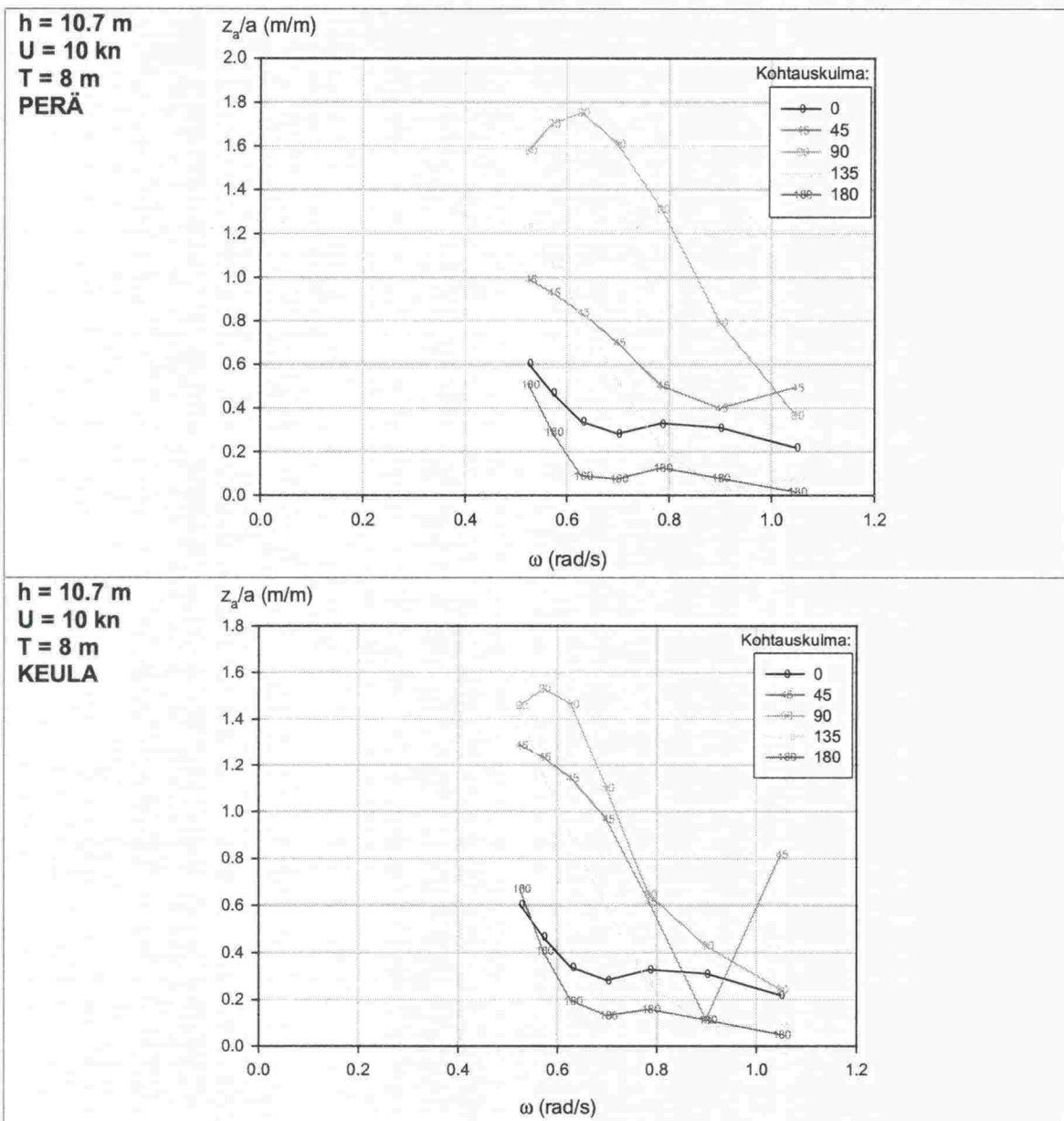
LIITE 1



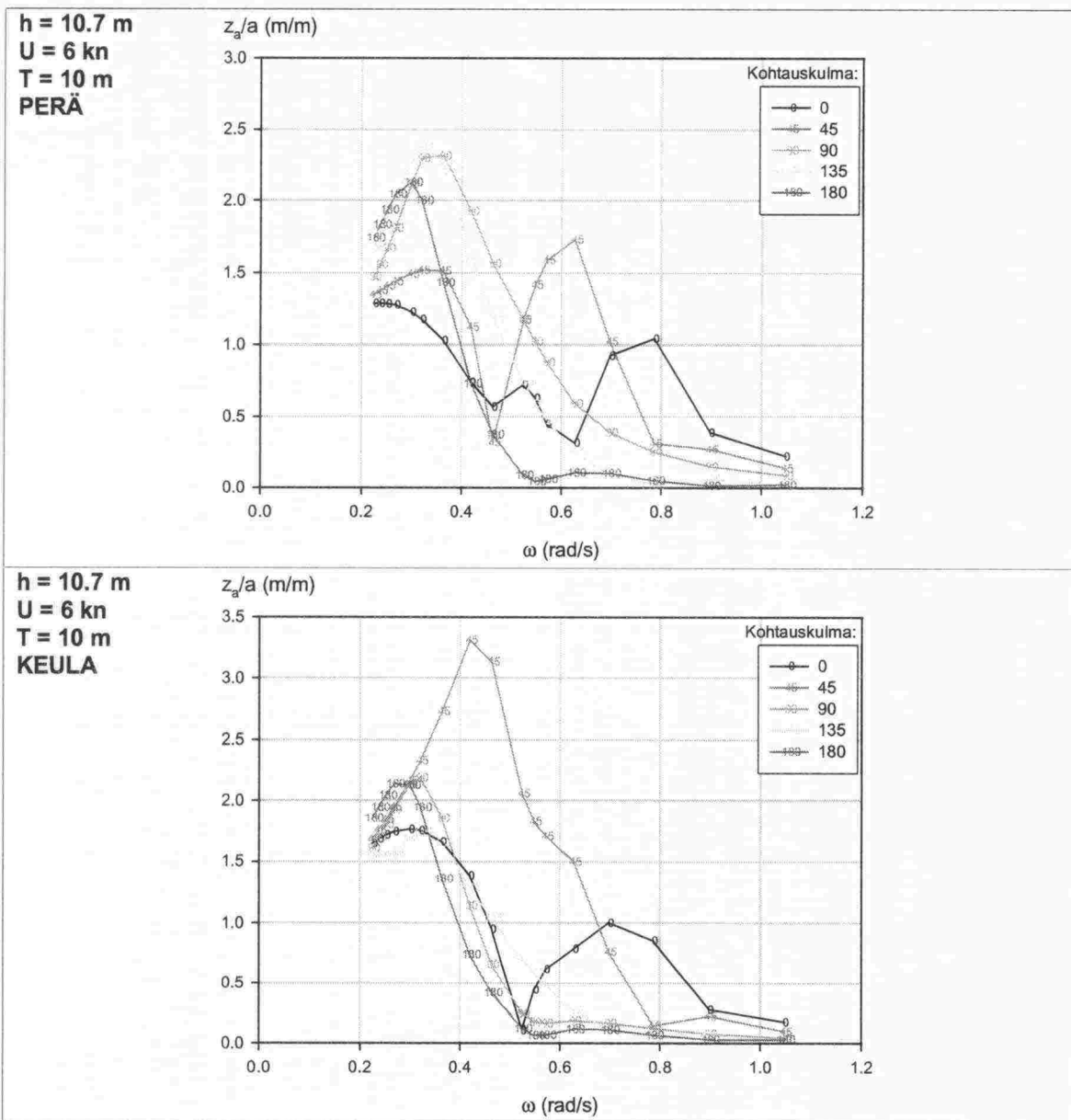
Tuulensuuntien esiintymistodennäköisyys Sandbäckin alueella.

LIITE 2

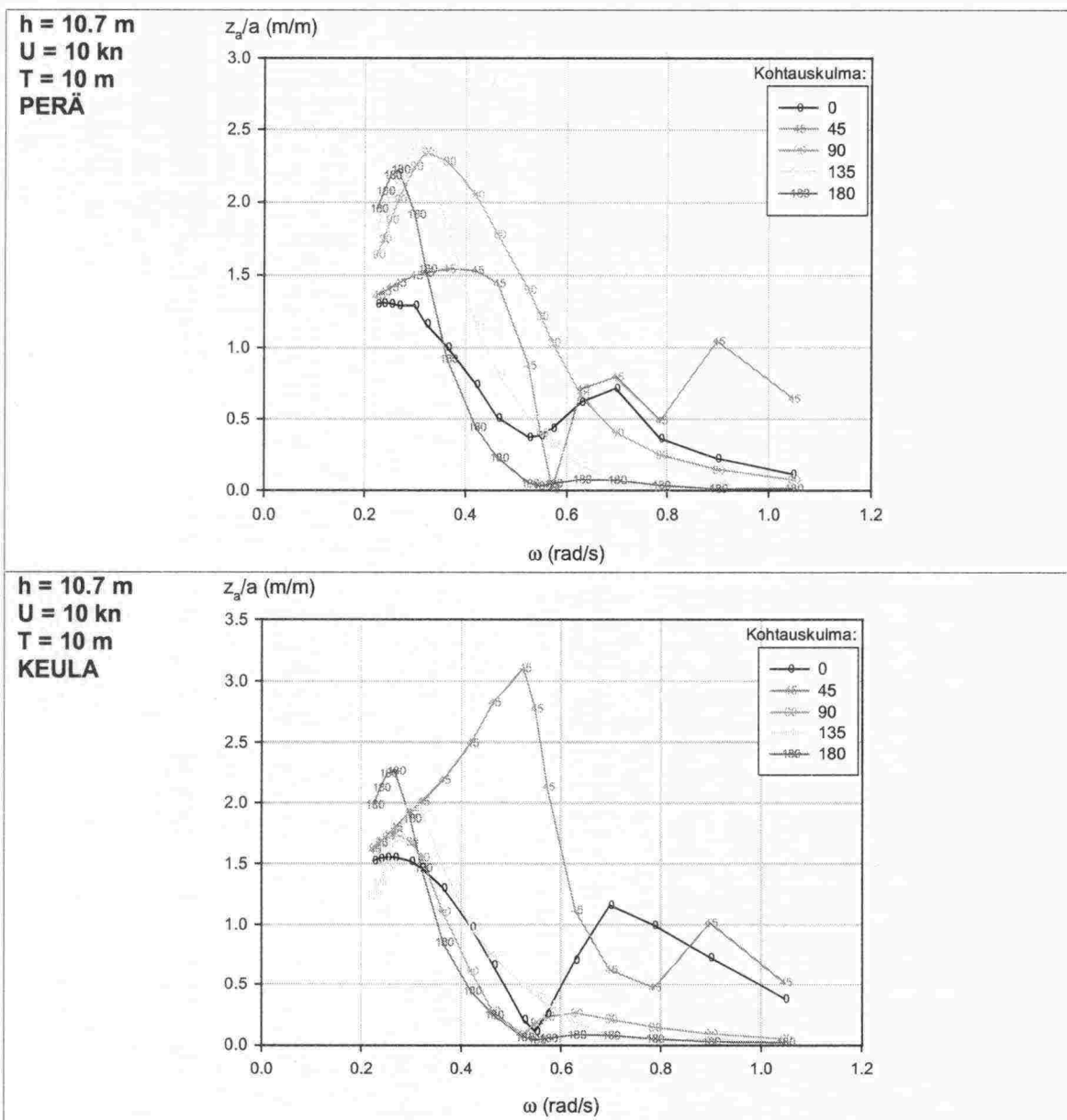
Pystyliikkeet säännöllisessä aallokossa



LIITE 2



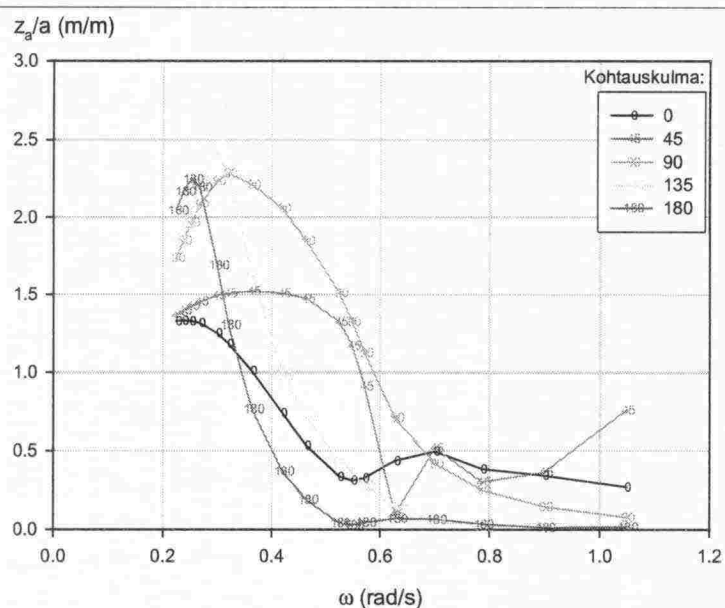
Siirtofunktiot 10 metrin syvyyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 6 solmua.

LIITE 2


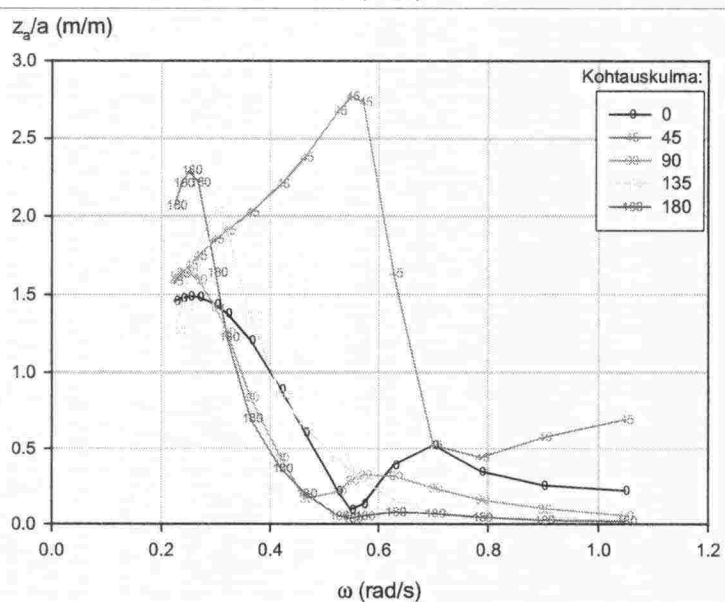
Siirtofunktiot 10 metrin syvyyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.

LIITE 2

$h = 10.7 \text{ m}$
 $U = 12 \text{ kn}$
 $T = 10 \text{ m}$
PERÄ

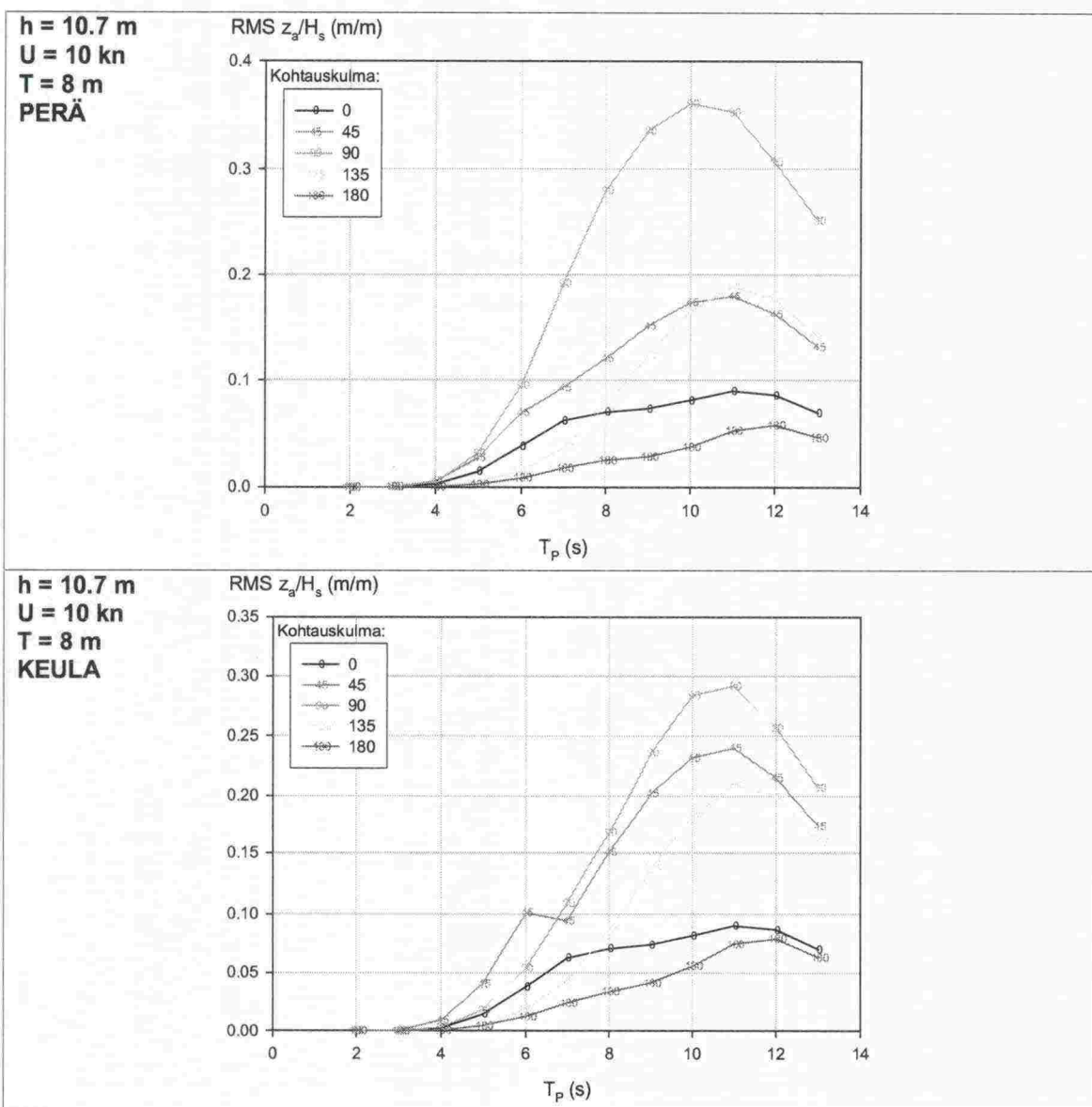


$h = 10.7 \text{ m}$
 $U = 12 \text{ kn}$
 $T = 10 \text{ m}$
KEULA



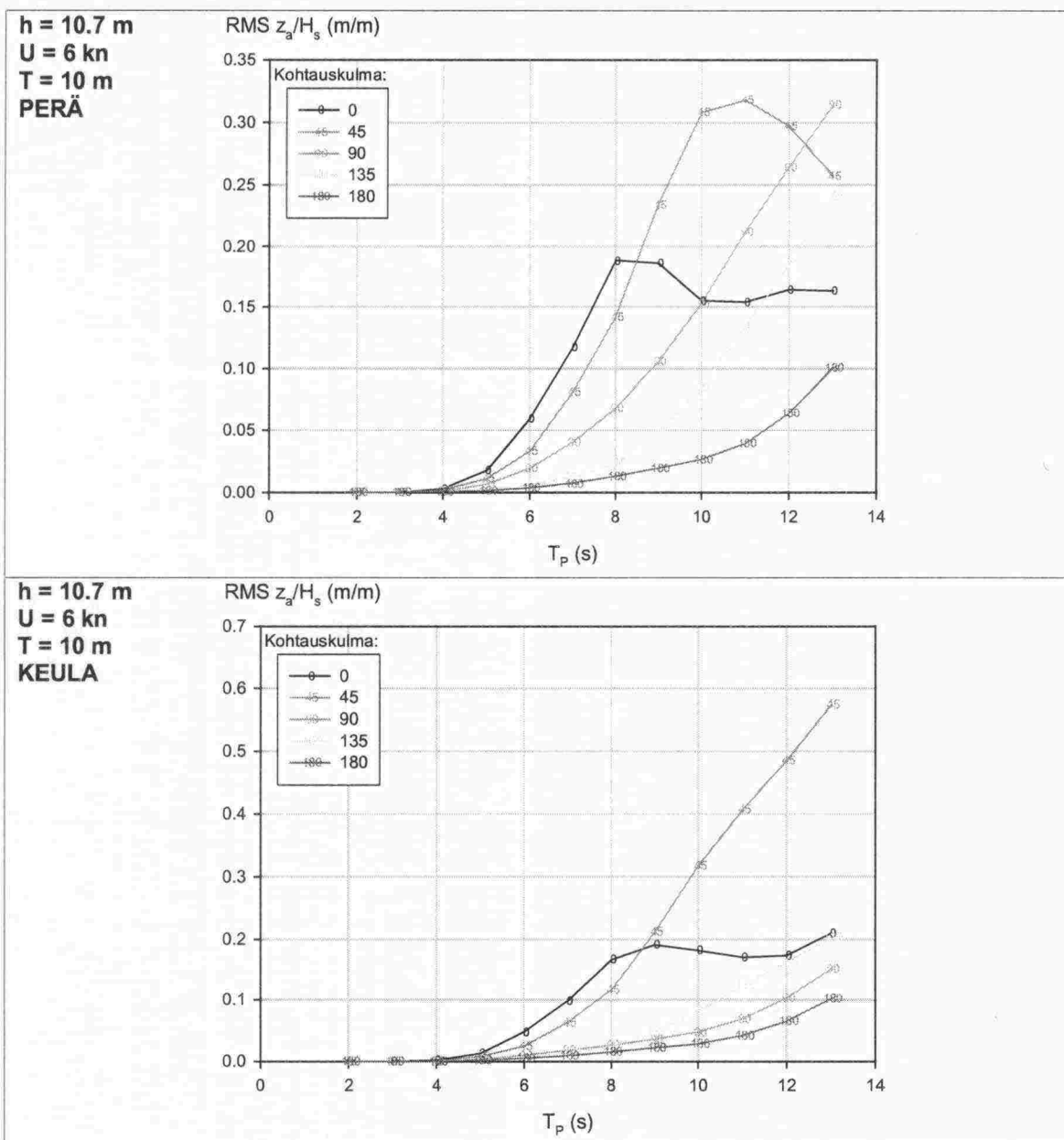
Siirtofunktiot 10 metrin syvyyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 12 solmua.

Pystyliikkeet epäsäännöllisessä aallokossa



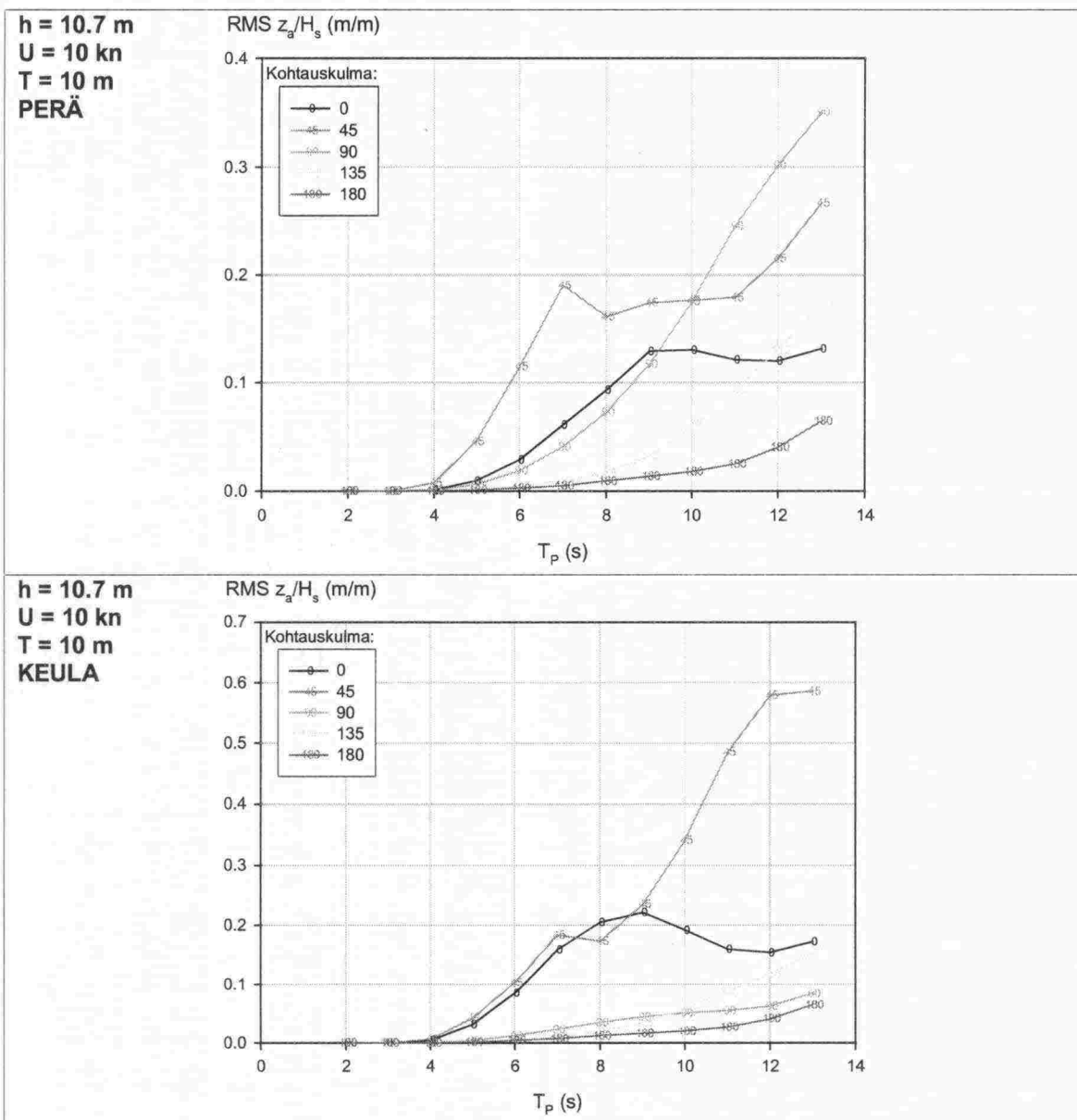
RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 8 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.

LIITE 3



RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 10 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 6 solmua.

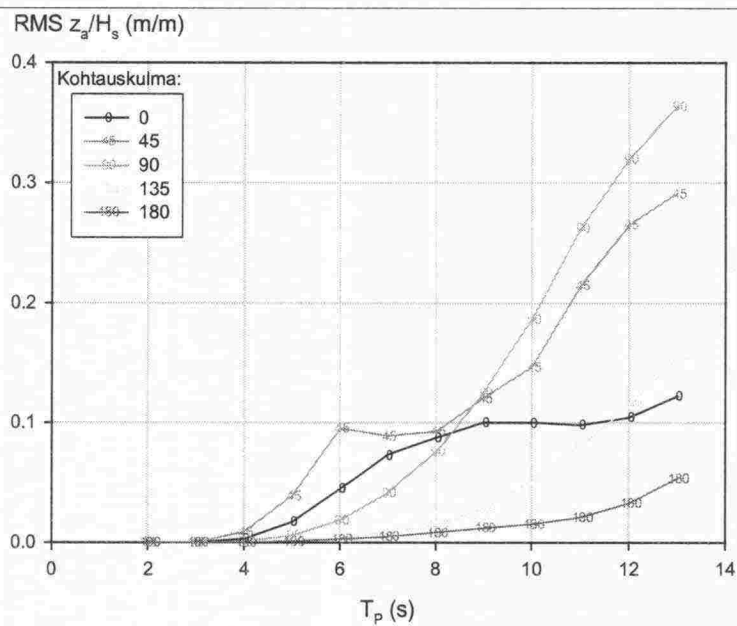
LIITE 3



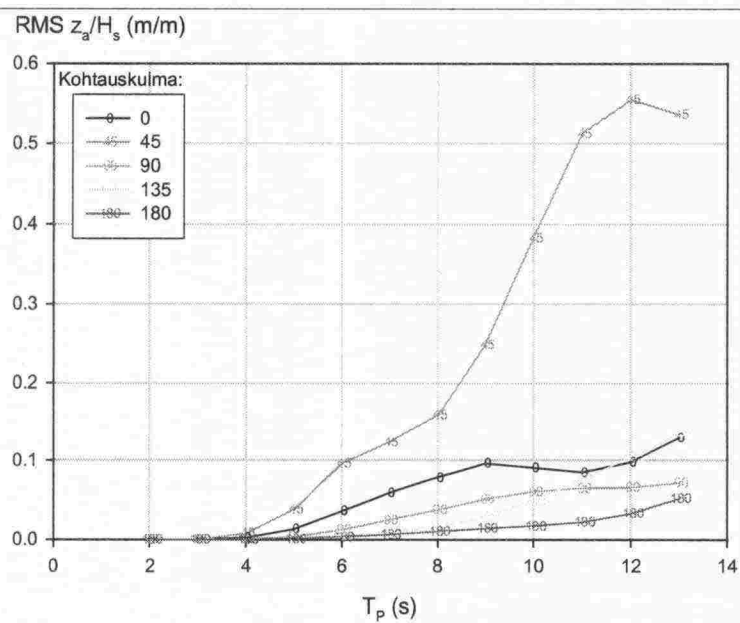
RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 10 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.

LIITE 3

$h = 10.7 \text{ m}$
 $U = 12 \text{ kn}$
 $T = 10 \text{ m}$
PERÄ

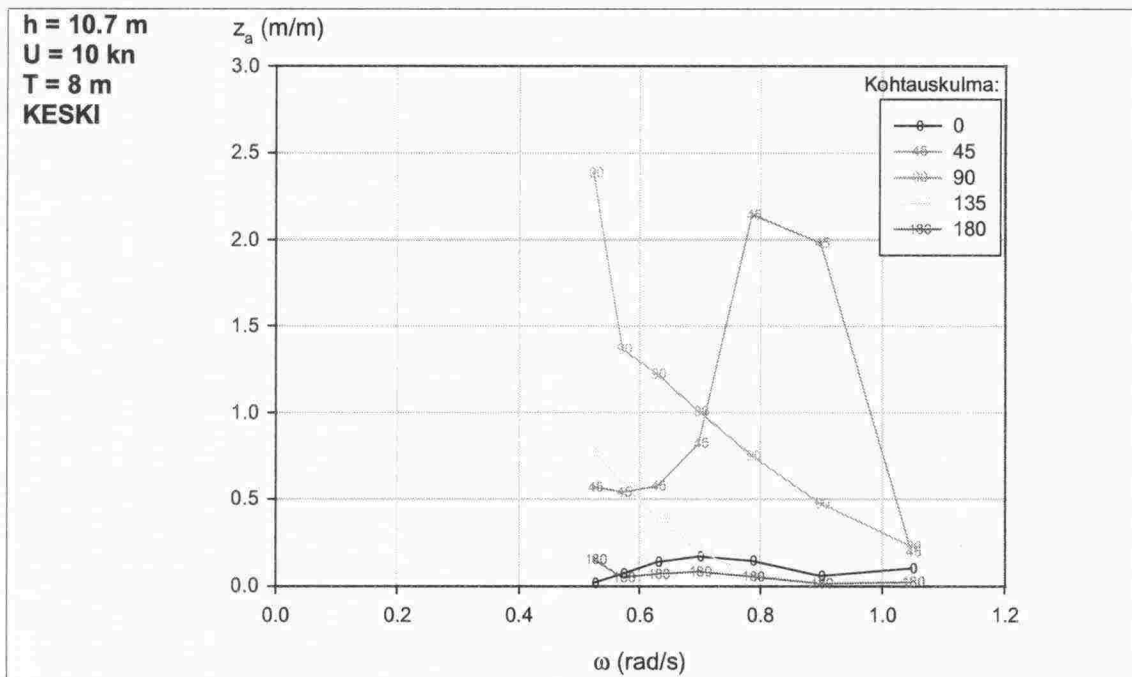


$h = 10.7 \text{ m}$
 $U = 12 \text{ kn}$
 $T = 10 \text{ m}$
KEULA

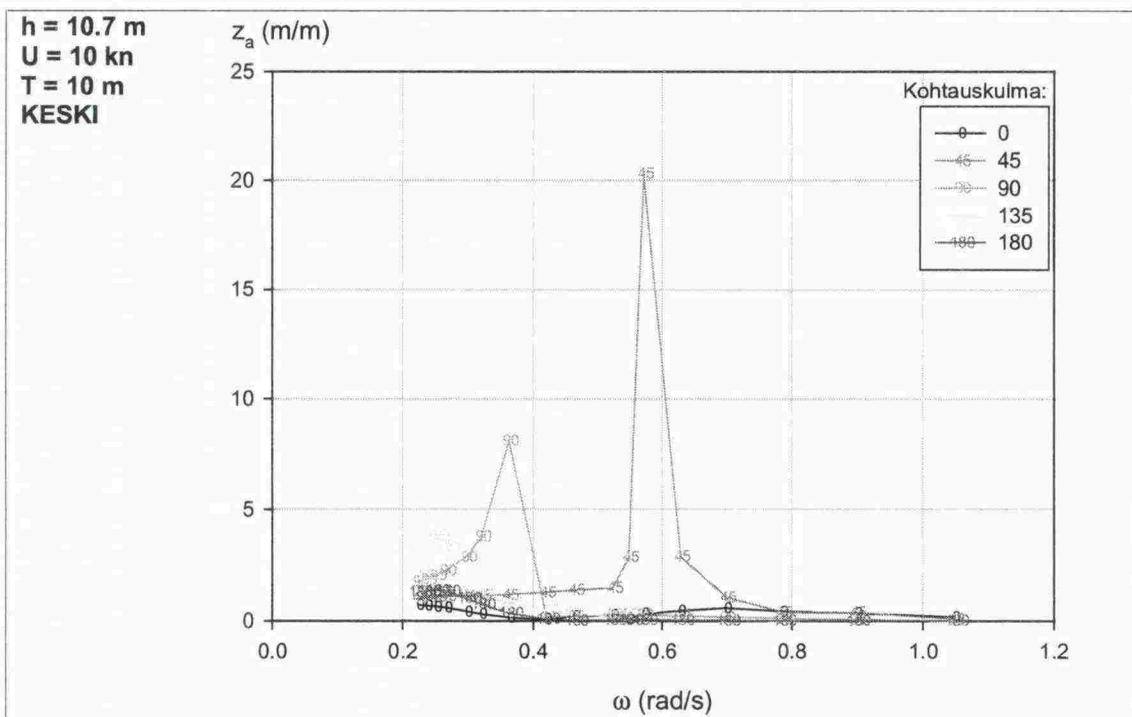


RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 10 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 12 solmua.

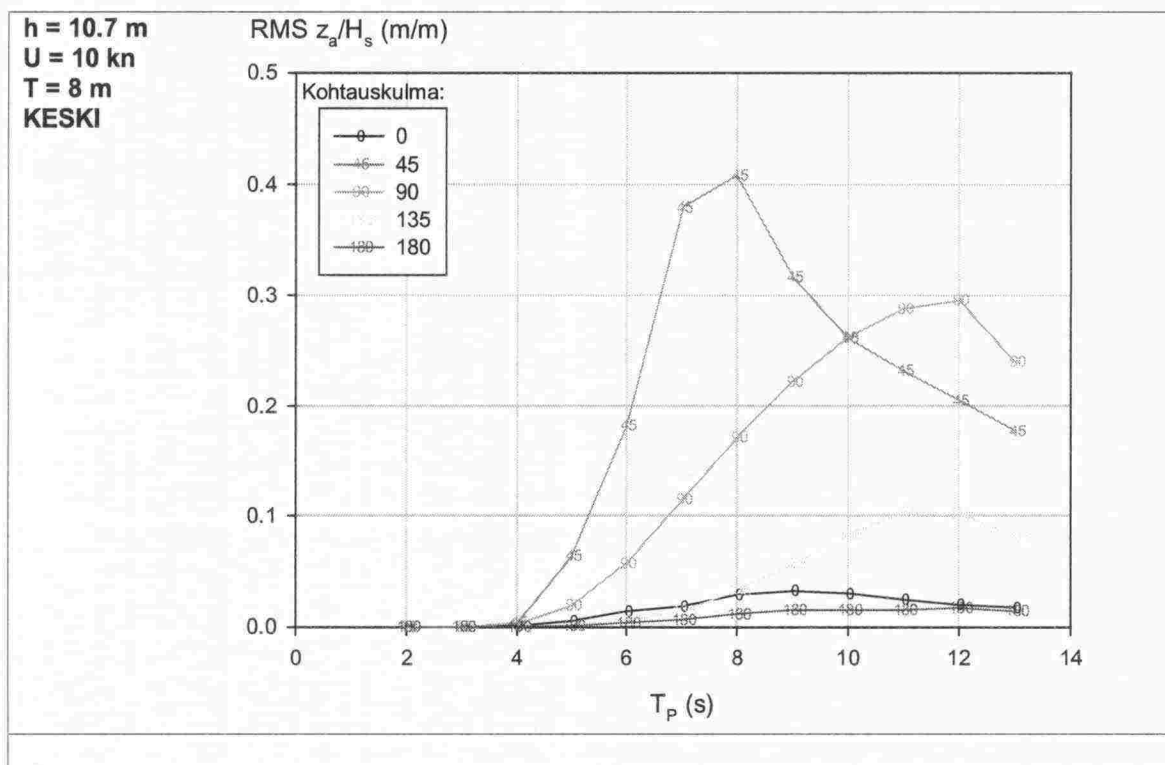
Keinunnan aiheuttama pystyliike palteitten kohdalla



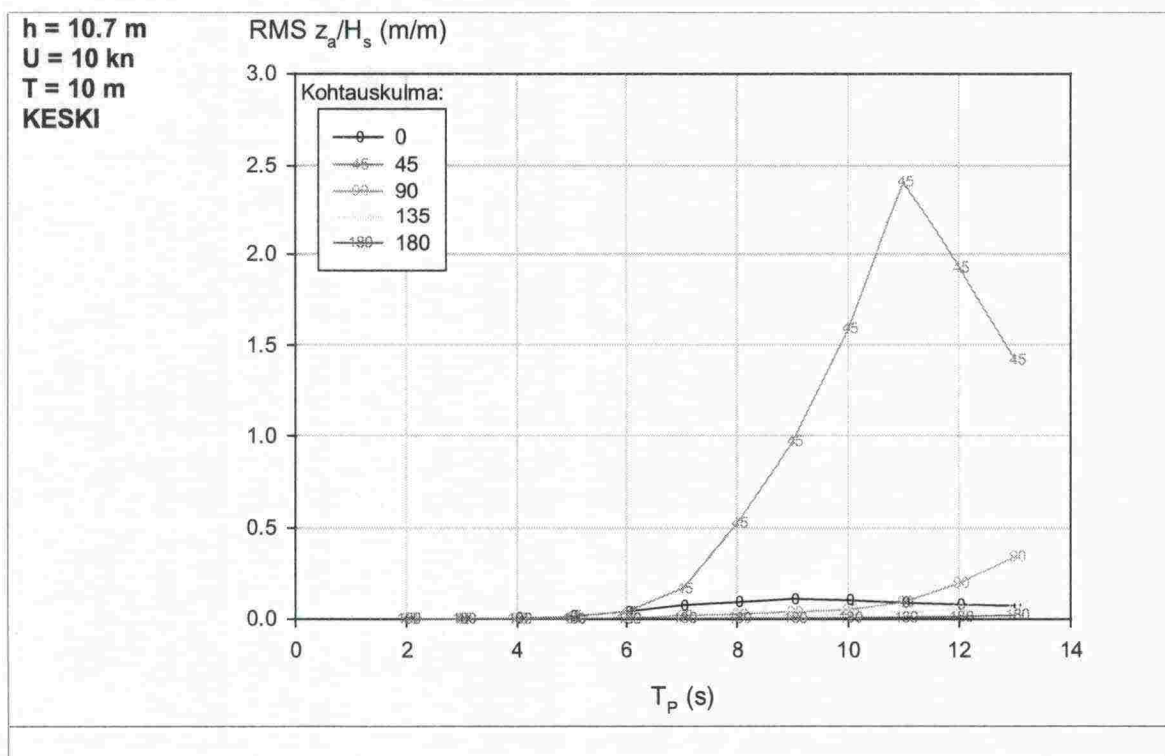
Siirtofunktiot 8 metrin syvyyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.



Siirtofunktiot 10 metrin syvyyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.

LIITE 4


RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 8 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.



RMS-arvot yksikön suuruiselle merkitsevälle aallon korkeudelle 10 metrin syväyden alukselle. Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.


LIITE 4

RMS-arvot yksikön suuruuselle merkitsevälle aallon korkeudelle 8 ja 10 metrin syväyden aluksille (yksiköt m/m). Vedensyvyys 10.7 m ja aluksen nopeus 10 solmua.

Aallonkohtauskulmat: 0, 45, 90, 135 ja 180 astetta ja aallon periodit $T_p = 2 \text{ s} \dots 13 \text{ s}$.

T=8 m U=10 kn						
	$T_p \text{ (s)}$	0	45	90	135	180
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.0012	0.0038	0.0027	0.0003	0.0002
	5	0.0053	0.0637	0.0192	0.0014	0.0012
	6	0.0140	0.1820	0.0572	0.0052	0.0036
	7	0.0185	0.3800	0.1150	0.0145	0.0064
	8	0.0287	0.4080	0.1710	0.0325	0.0116
	9	0.0324	0.3170	0.2220	0.0571	0.0153
	10	0.0298	0.2610	0.2620	0.0829	0.0154
	11	0.0245	0.2320	0.2880	0.1030	0.0155
	12	0.0201	0.2050	0.2960	0.1020	0.0172
	13	0.0174	0.1770	0.2400	0.0806	0.0142

T=10 m U=10 kn						
	$T_p \text{ (s)}$	0	45	90	135	180
	2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	4	0.0020	0.0010	0.0003	0.0002	0.0000
	5	0.0139	0.0121	0.0021	0.0008	0.0003
	6	0.0387	0.0390	0.0068	0.0020	0.0009
	7	0.0733	0.1690	0.0149	0.0036	0.0020
	8	0.0918	0.5270	0.0251	0.0069	0.0025
	9	0.1080	0.9710	0.0366	0.0136	0.0040
	10	0.1020	1.5900	0.0493	0.0233	0.0060
	11	0.0878	2.4100	0.0916	0.0363	0.0082
	12	0.0779	1.9300	0.1980	0.0504	0.0119
	13	0.0699	1.4200	0.3460	0.0685	0.0197

 Punaisella merkityt laskenta-arvot ovat käytetyn teorian perusteella epäluotettavia.